

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES FILERES NO DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

ADRIANO MANUEL DA SILVA TEIXEIRA

Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil
na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

Co-Orientadores: Doutora Engenheira Maria da Conceição Monteiro Azevedo
Doutora Susana Maria Ribeiro e Sousa Mendes de Freitas

Dezembro de 2015

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
RÉSUMÉ.....	xi
AGRADECIMENTOS	xiii
ÍNDICE DE TEXTO	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxiii
ÍNDICE DE TABELAS	xxxiii
SIMBOLOGIA	xxxvii
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Betumes para misturas betuminosas	13
Capítulo 3 Fileres para misturas betuminosas	65
Capítulo 4 Mástiques betuminosos.....	117
Capítulo 5 Misturas betuminosas	153
Capítulo 6 Resultados e discussão.....	183
Capítulo 7 Conclusões.....	309
Referências bibliográficas.....	319

RESUMO

O presente trabalho dedica-se a estudar os fileres usualmente utilizados em Portugal no fabrico de misturas betuminosas, procurando avaliar de que forma as suas características mecânicas, físicas e químicas, influenciam o desempenho dos mástiques betuminosos e das misturas betuminosas onde são incorporados.

Este estudo inicia-se com um primeiro capítulo onde é apresentada uma breve introdução inicial, que pretende fazer o enquadramento e apresentação do trabalho desenvolvido.

Uma mistura betuminosa deve ser entendida como uma mistura de agregados de várias granulometrias, ligados por um mástique betuminoso, que por sua vez é composto por uma mistura de betume e filer. Assim, entendeu-se conveniente numa primeira fase do trabalho, dedicar dois capítulos ao estudo destes dois materiais, betume e filer, de forma individualizada. Nestes capítulos, 2 e 3, são apresentadas as propriedades mais relevantes destes dois materiais, sendo também analisada a forma como essas propriedades são capazes de influenciar as características da mistura dos dois materiais, ou seja, do mástique betuminoso. Apresentam-se igualmente as metodologias mais relevante para a quantificação laboratorial dessas propriedades, procurando estabelecer as vantagens e desvantagens associadas a cada um dos métodos apresentados.

O trabalho continua com mais dois capítulos dedicados ao estudo do mástique betuminoso e das misturas betuminosas, onde são apresentadas as metodologias associadas à avaliação quantitativa das propriedades mais relevantes destes materiais, procurando estabelecer de que forma o seu comportamento é influenciado pelas características do tipo de betume e principalmente do tipo e características dos fileres, bem como da concentração do filer no mástique betuminoso. No capítulo 4, dedicado aos mástiques betuminosos, é dada especial importância às metodologias de ensaio utilizadas na caracterização do comportamento do mástique betuminoso bem como ao envelhecimento deste material a curto e a longo prazo. Uma vez que não existem métodos de ensaio para o estudo dos mástiques, enquanto material resultante da mistura do betume com o filer, foram utilizadas metodologias associadas ao estudo dos betumes, realizando as alterações consideradas mais convenientes, para adaptar as metodologias às características próprias dos materiais ensaiados.

Na última parte do trabalho, capítulo 6, são apresentados os valores obtidos em toda a parte experimental realizada, estabelecidas algumas considerações quanto às metodologias de ensaio, nomeadamente quanto às dificuldades sentidas definindo algumas alterações necessárias realizar aos métodos de ensaio, por forma a tornar os métodos exequíveis para todos os tipos de filer. Neste capítulo são ainda discutidos, os valores obtidos nos ensaios realizados e estabelecidas as correlações encontradas.

Por último, o capítulo 7 apresenta um resumo das principais conclusões obtidas neste trabalho e sugere alguns aspetos a considerar em futuras abordagens a este tema, como resultado da experiência adquirida ao longo deste trabalho.

ABSTRACT

This work aims to study the fillers usually used in Portugal in the manufacture of bituminous mixtures, trying to assess how their mechanical, physical and chemical characteristics influence the performance of bituminous mastics and bituminous mixtures.

This study begins with a first chapter which makes a brief introduction to frame and present the work carried out.

A bituminous mixture should be understood as a mixture of aggregates of various grain sizes connected by a bituminous mastic which in turn is composed of a mixture of bitumen and filler. As such, it was considered appropriate in the first phase of the work to dedicate two chapters to the individual study of these two materials, bitumen and filler. Chapters 2 and 3 therefore present the most relevant properties of these two materials and how they can influence the characteristics of the mixture of the two, that is, the bituminous mastic. These chapters also present the methodologies for laboratory measurement of these properties, identifying all existing methodologies and trying to identify the advantages and disadvantages associated with each of these methods.

Work continues with two other chapters devoted to the study of bituminous mastic and bituminous mixtures, evaluating quantitatively the most relevant properties of these materials, in trying to establish how their behaviour is influenced by the characteristics of the bitumen type and mainly the type and characteristics of the fillers, as well as the concentration of the filler in the bituminous mastic. Chapter 4, dedicated to bituminous mastics, pays special attention to testing methodologies used in the characterisation of bituminous mastic behaviour and to the aging of this material in the short and in the long run. As a material resulting from the mixture of bitumen with the filler, and in the absence of testing methods for the study of mastics, methodologies associated with the study of bitumen were used with the adjustments deemed more convenient to adapt those methodologies to the specific characteristics of the tested materials.

In the final part of the work, chapter 6, results obtained in the experimental part are presented, the figures obtained are discussed and the correlations found are established.

Finally, Chapter 7 summarizes the main conclusions of this study and suggests some aspects to be considered in future approaches to this subject as a result of the experience acquired throughout this work.

RÉSUMÉ

Ce travail est consacré à l'étude des fillers habituellement utilisés au Portugal dans la fabrication de mélanges bitumineux, en essayant d'évaluer comment leurs caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques influencent la performance des mastics bitumineux et des mélanges bitumineux.

Cette étude commence par un premier chapitre faisant une brève introduction pour encadrer et présenter le travail effectué.

Un mélange bitumineux doit être compris comme un mélange des granulats de différentes granulométries reliées par un mastic bitumineux qui est à son tour composée d'un mélange de bitume et de filler. Ainsi, il a été jugé approprié dans une première phase de consacrer deux chapitres à l'étude de ces deux matériaux, bitume et filler, individuellement. Dans ces chapitres 2 et 3 sont présentés les propriétés les plus pertinentes et comme ils peuvent influencer les caractéristiques du mélange des deux, le mastic bitumineux. Ils sont également présentés les méthodes de mesure de ces propriétés en laboratoire, en identifiant toutes les méthodes existant et en essayant d'identifier les avantages et les inconvénients associés à chacune de ces méthodes.

Le travail se poursuit avec deux autres chapitres consacrés à l'étude du mastic bitumineux et des mélanges bitumineux, à travers d'une évaluation quantitative des propriétés les plus pertinents de ces matériaux, en essayant d'établir de quelle façon leur comportement est influencé par les caractéristiques du type de bitume et surtout le type et les caractéristiques des fillers, ainsi que la concentration du filler dans le mastic bitumineux. Dans le chapitre 4, consacré aux mastics bitumineux, une attention particulière est accordée aux méthodologies de test utilisées pour caractériser le mastic bitumineux et le vieillissement de ce matériau à court et à long terme. Comme matériel résultant du mélange de bitume avec le filler, et en l'absence de méthodologies d'essai pour l'étude des mastics, des méthodologies associés à l'étude de bitume ont été utilisés, avec des ajustements jugés plus convenantes pour ajuster ces méthodologies aux caractéristiques propres des matériaux testés.

Dans la dernière partie du travail, le chapitre 6, les résultats obtenus dans la partie expérimentale sont présentés, les valeurs obtenues sont discutés et les corrélations trouvées sont établies.

Enfin, le chapitre 7 résume les principales conclusions obtenues dans cette étude et suggère quelques aspects à considérer dans les futures approches à ce sujet à la suite de l'expérience acquise tout au long de ce travail.

AGRADECIMENTOS

No decurso deste trabalho, contei com a ajuda de muitos amigos, que com o seu empenho e colaboração, me transmitiram não só conhecimento mas também apoio e incentivo, contribuindo assim, de forma decisiva, para a concretização deste projeto. A eles devo não só a partilha de conhecimentos e ajuda para encontrar soluções, mas também as palavras certas em muitos momentos decisivos, para manter o foco e a motivação necessárias para prosseguir com esta grande tarefa.

Expresso publicamente o meu agradecimento a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a concretização desta tese:

Ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro, orientador científico deste trabalho, pela disponibilidade na orientação, pela crítica construtiva, pelos conselhos e insistência e pela amizade.

À Doutora Maria da Conceição Azevedo, coorientadora, pelo cuidado que colocou em todos os aspetos, empenho científico e profissional, pela confiança que depositou em mim e principalmente pela grande amizade partilhada.

À Doutora Susana Sousa, pela forma amiga como me ajudou e acompanhou em todos os momentos, pelos conselhos, críticas e sugestões que foram colocadas ao longo de todo o trabalho.

Ao Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN), na pessoa do seu Diretor, Engenheiro Sampaio Rodrigues, pela disponibilidade que prontamente transmitiu, em representação da instituição, em me apoiar no que fosse necessário e pela confiança em mim depositada. Só assim foi possível realizar, no LGMC - Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN, no qual tenho a honra de trabalhar, muitos dos ensaios apresentados neste trabalho. Aos colaboradores do laboratório, a todos sem exceção, um agradecimento muito especial, pela colaboração e compreensão.

Ao Instituto Superior de Engenharia Civil do Porto (ISEP), onde eu tenho o imenso prazer em partilhar conhecimentos e experiências com os meus alunos. Ao Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, nomeadamente ao seu Diretor, Professor Doutor José Augusto Fernandes, pelos ensinamentos, pela disponibilidade em colaborar na realização de alguns ensaios dos fileres no laboratório de rochas e agregados e pelo incentivo constante.

À Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), à Doutora Isabel Fernandes e Doutora Maria dos Anjos, pela disponibilidade e acompanhamento na observação microscópica dos fileres.

Ao Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP), ao Doutor Carlos Sá, pelas imagens no SEM e pelos ensinamentos e disponibilidade.

À Lusical, pelo patrocínio imprescindível para a realização de uma parte significativa dos ensaios realizados, sem o qual não teria sido possível este trabalho. Não posso aqui deixar de fazer uma referência especial ao Engenheiro Mário Marques por, há uns anos atrás, me ter lançado o desafio, e, como se não bastasse, pelo empenho pessoal que colocou no desenvolvimento de todas as fases deste projeto, pela confiança sempre demonstrada e pela amizade que ficou.

À Lhoist, pelo patrocínio na realização de uma parte importante dos ensaios, referindo aqui o Engenheiro Didier Leuseur, pela forma apaixonada como recebeu o desafio, pelos ensinamentos transmitidos e pelos recursos disponibilizados.

À empresa Eurocálcio, nomeadamente à Engenheira Anabela Figueiredo, pela contribuição na realização de alguns ensaios e pelo fornecimento das amostras.

À Secil, nomeadamente aos Engenheiros Ângela Nunes, Cristina Sequeira e Vitor Vermelhudo, pelos ensaios realizados, meios disponibilizados e amostras fornecidas.

À Galp, Engenheiros Susana Maricato e Paulo Falcão Ferreira, pelos ensaios realizados e amostras disponibilizadas.

À Cepsa, Engenheiros Luís Vieira e Tito Conrado pelas amostras disponibilizadas para ensaios.

À Cin, Doutora Etelvina Veludo e Engenheiro Vasco Lopes, não só pelos meios disponibilizados e ensaios realizados, mas também pelos ensinamentos e empenho sempre demonstrados. Obrigado também pela amizade.

À Brisa, Engenheira Daniela Domingues pelos meios disponibilizados, empenhamento pessoal e amizade.

À empresa Neves & Neves, ao Nelson Neves pela colaboração prestada.

Pelo fornecimento de amostras para ensaios, às empresas: MonteAdriano, MotaEngil, Amândio Carvalho, Gabriel Couto, Cidade Virtual, Construções Pragosa, Lena Engenharia, MSF Engenharia, nomeadamente ao seu colaborador Licínio Pereira.

Aos meus colegas e amigos do ISEP quero também agradecer a todos eles, fazendo uma especial referência à Elisabete Esteves, Manuela Carvalho e Sílvia Spínola.

Aos meus amigos Fernando Castelo Branco, Rui Micaelo, Vitor Gomes, Rogério Pinheiro, Marta Miranda, Guilhermina Castro e Cristina Sousa.

Aos meus irmãos e sobrinhos pela paciência demonstrada e em especial à Anabela, ao João e ao Filipe pela colaboração.

Deixei para o fim o agradecimento maior, aos meus filhos Afonso e Diogo, por nunca se cansarem de me encorajar e pela compreensão demonstrada, e à minha mulher Maria José pela imensa ajuda e por sempre ter acreditado, mantendo-se sempre ao meu lado.

A TODOS, OBRIGADO

ÍNDICE DE TEXTO

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivos	7
1.3.	Estrutura e conteúdo	9
2.	Betumes para misturas betuminosas.....	13
2.1.	Introdução	13
2.2.	Reologia	21
2.2.1.	Viscosidade	24
2.2.2.	Rigidez	28
2.3.	Envelhecimento.....	32
2.4.	Caracterização laboratorial	35
2.4.1.	Quantificação da viscosidade.....	35
2.4.1.1.	Viscosímetros de tubo capilar	35
2.4.1.2.	Viscosímetros de orifício	36
2.4.1.3.	Viscosímetros de queda de esfera	36
2.4.1.4.	Viscosímetros rotativos.....	37
2.4.2.	Quantificação da rigidez com reómetro de corte dinâmico	40
2.4.3.	Metodologias para simular o envelhecimento em laboratório	45
2.5.	Tipos de betumes	50
2.5.1.	Betumes de pavimentação e betumes duros.....	50
2.5.2.	Betumes modificados.....	56
2.6.	Conclusões do capítulo	61
3.	Fileres para misturas betuminosas.....	65
3.1.	Introdução	65
3.2.	Tipos de fileres utilizados em Portugal no fabrico de misturas betuminosas	67
3.2.1.	Fileres recuperados em central.....	68
3.2.2.	Fileres comerciais naturais.....	68
3.2.3.	Fileres comerciais artificiais	70
3.2.3.1.	Cal	71
3.2.3.1.1.	Cal aérea	72
3.2.3.1.2.	Cal hidráulica	80

3.2.3.2.	Cimento Portland.....	82
3.3.	Características dos fileres e metodologias de ensaio para a sua avaliação	84
3.3.1.	Características físicas/geométricas	84
3.3.1.1.	Granulometria.....	84
3.3.1.1.1.	Processos por peneiração.....	88
3.3.1.1.2.	Processos gravimétricos	89
3.3.1.1.3.	Processos por emissão de energia.....	91
3.3.1.1.3.1.	Difração laser	91
3.3.1.1.3.2.	Dispersão de luz dinâmica (DLS – <i>Dynamic Light Scattering</i>)	97
3.3.1.1.4.	Processos de análise de imagens	97
3.3.1.2.	Forma e angulosidade das partículas e textura da superfície.....	99
3.3.1.3.	Massa volúmica.....	101
3.3.1.4.	Massa volúmica aparente em querosene	102
3.3.1.5.	Vazios do filer seco compactado (<i>Rigden voids</i>).....	103
3.3.1.6.	Número de betume	104
3.3.1.7.	Variação da temperatura anel e bola	105
3.3.1.8.	Superfície específica.....	106
3.3.1.9.	Porosidade	108
3.3.2.	Comportamento e composição química	109
3.3.2.1.	Solubilidade em água	109
3.3.2.2.	Argilosidade	110
3.3.2.3.	Determinação do pH da suspensão em água	111
3.3.2.4.	Suscetibilidade à água	111
3.3.2.5.	Avaliação dos elementos químicos presentes	112
3.4.	Conclusões do capítulo.....	113
4.	Mástiques betuminosos	117
4.1.	Introdução.....	117
4.2.	Adesão e coesão	120
4.2.1.	Conceito de adesão e coesão	120
4.2.2.	Teorias da adesão nas misturas betuminosas.....	128
4.2.2.1.	Teoria mecânica	129
4.2.2.2.	Teoria eletrostática	130
4.2.2.3.	Teoria da adsorção, termodinâmica ou da energia superficial livre	131
4.2.2.4.	Teoria química.....	133
4.3.	Comportamento do mástique betuminoso	136

4.4.	Metodologias para o estudo laboratorial	145
4.5.	Conclusões do capítulo	150
5.	Misturas betuminosas	153
5.1.	Introdução	153
5.2.	Ensaio de caracterização de misturas betuminosas	155
5.2.1.	Sensibilidade à água e afinidade agregado/betume.....	156
5.2.1.1.	Ensaio em misturas betuminosas não compactadas	157
5.2.1.1.1.	“ <i>Net Adsorption Test</i> ”	158
5.2.1.1.2.	Método Imersão Estática – “ <i>Static-Immersion Test</i> ”	159
5.2.1.1.3.	Método de Ebulição – “ <i>Boiling Water Test</i> ”	159
5.2.1.1.4.	Ensaio de Afinidade Agregado/Betume.....	160
5.2.1.2.	Ensaio em misturas betuminosas compactadas	162
5.2.1.2.1.	Ensaio Imersão/Compressão – “ <i>Immersion/Compression Test</i> ”	163
5.2.1.2.2.	Ensaio Lottman – “ <i>Lottman Test</i> ”	163
5.2.1.2.3.	Ensaio Lottman Modificado – “ <i>Modified Lottman Test</i> ”	163
5.2.1.2.4.	Ensaio de Resistência Conservada – “ <i>Marshall Immersion Test</i> ”	164
5.2.1.2.5.	Ensaio de Sensibilidade à Água - “ <i>Indirect Tensile Strength Ratio</i> ”	164
5.2.1.2.6.	Ensaio Cantabro	166
5.2.1.2.7.	Ensaio Duriez.....	167
5.2.1.2.8.	Ensaio “ <i>Wheel-Tracking</i> ” Imerso – “ <i>Hamburg Wheel Tracking Device</i> ”	167
5.2.2.	Avaliação do comportamento mecânico de uma mistura betuminosa	168
5.2.2.1.	Rigidez	168
5.2.2.1.1.	Tração indireta	170
5.2.2.1.2.	Ensaio de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos	172
5.2.2.2.	Fadiga.....	174
5.2.2.3.	Deformações permanentes	178
5.2.2.3.1.	Carregamento uniaxial	178
5.2.2.3.2.	Ensaio “ <i>Wheel Tracking</i> ”	178
5.3.	Conclusões do capítulo	180
6.	Resultados e discussão	183
6.1.	Ensaio em fileres	183
6.1.1.	Introdução	183
6.1.2.	Granulometria	185
6.1.2.1.	Por peneiração.....	185

6.1.2.2.	Difração laser	187
6.1.3.	Forma e angulosidade das partículas e textura da superfície das partículas	194
6.1.4.	Massa volúmica do filer	203
6.1.5.	Massa volúmica aparente do filer em querosene	206
6.1.6.	Vazios do filer seco compactado	209
6.1.7.	Viscosidade aparente ou número de betume	213
6.1.8.	Variação da temperatura anel e bola	216
6.1.9.	Superfície específica do filer	219
6.1.10.	Solubilidade em água	221
6.1.11.	Suscetibilidade à água	222
6.1.12.	Argilosidade do filer – Ensaio do azul de metileno.....	222
6.1.13.	Determinação do pH da suspensão do filer em água.....	223
6.1.14.	Avaliação dos elementos químicos presentes.....	225
6.1.15.	Conclusões sobre os resultados dos ensaios dos fileres	228
6.2.	Ensaio em betumes e mástiques betuminosos.....	235
6.2.1.	Betumes	235
6.2.2.	Mástiques betuminosos	236
6.2.2.1.	Viscosidade dinâmica com viscosímetro rotativo	237
6.2.2.2.	Envelhecimento	256
6.2.2.3.	Ensaio com reómetro de corte.....	262
6.2.2.4.	Ensaio de aderência BBS	279
6.2.3.	Conclusões sobre os resultados dos ensaios dos betumes e mástiques betuminosos	286
6.3.	Ensaio em misturas betuminosas	289
6.3.1.	Introdução.....	289
6.3.2.	Ensaio Cantabro.....	291
6.3.3.	Ensaio de sensibilidade à água.....	294
6.3.4.	Ensaio de comportamento às deformações permanentes	296
6.3.5.	Ensaio de rigidez e de fadiga	299
6.3.6.	Conclusões sobre os resultados dos ensaios de misturas betuminosas	307
7	Conclusões	309
7.1.	Resumo do trabalho e conclusões finais.....	309
7.1.1.	Planeamento das diferentes fases do trabalho	310
7.1.2.	Conclusões finais.....	311

7.2.	Trabalhos futuros	317
Referências bibliográficas.....		319
	Bibliografia	319
	Documentos normativos	332

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Principais processos industriais na destilação do crude para a obtenção do betume, adaptado de www.eurobitume.eu/bitumen/production-process	14
Figura 2.2 – Proporções relativas dos hidrocarbonetos presentes num betume, função do seu índice de penetração, adaptado de Read & Whiteoak, 2003	16
Figura 2.3 – Estrutura “SOL” de um betume, adaptado de Read & Whiteoak, 2003	17
Figura 2.4 – Estrutura “GEL” de um betume, adaptado de Read & Whiteoak, 2003.	17
Figura 2.5 – Equipamento de calorimetria diferencial de varrimento www.lmsscscientific.com/products.php?prod_name=thermal-analysis	20
Figura 2.6 – Esquema do escoamento de um fluído, adaptado de Barnes et al., 1989.	25
Figura 2.7 – Esquema da variação da viscosidade e da tensão de corte com a taxa de corte, adaptado de Lauger & Bernzen, 2000.	27
Figura 2.8 – Esquema da variação do módulo da viscosidade complexa e da componente real do módulo de corte complexo com a velocidade angular, adaptado de Lauger & Bernzen, 2000	28
Figura 2.9 – Esquema de um carregamento sinusoidal (a azul) e respetivas extensões (a vermelho).	31
Figura 2.10 – Viscosímetro de tubo capilar para avaliação da viscosidade cinemática, www.khushbooscientific.com/Oil-Petroleum-Bitumen-Concrete-Test-Instruments.htm	36
Figura 2.11 – Viscosímetro de tubo capilar para avaliação da viscosidade dinâmica por vácuo www.jingkeyiqi.com/html/product/show_product_wl_3364.html	36
Figura 2.12 – Viscosímetros de orifício, a) Redwood, www.matest.com/en/Products/bitumen-sphalt/VISCOMETERS/engler-viscometers/b080-engler-digital-viscometer-0 b) Saybolt, www.aliexpress.com/item/JK-SVT-23-Saybolt-Viscosity-ester/462385064.html c) Engler www.lab-kits.com/PT-EV-03 d) Copo Ford, www.aimil.com/product-Flow_Cup_(AIM_539)-1009.aspx	37
Figura 2.13 – Viscosímetro de queda de esfera (en.petrotech.ru/en/equipment/D/1/).	37
Figura 2.14 – Viscosímetros rotativos: a) Stormer, www.getdomainvids.com/keyword/stormer%20viscometer/ b) De pratos paralelos, www.labwrench.com/?equipment.view/equipmentNo/9018/ATS-RheoSystems/MERLIN-Viscometer/ c) Brookfield, www.coleparmer.com/Product/Brookfield_Low_range_viscometer_115_VAC/EW-98945-00	38
Figura 2.15 – a) Viscosímetro rotativo b) agulhas utilizadas nos ensaios de viscosidade	39
Figura 2.16 – Preparação de provetes para o ensaio com reómetro de corte dinâmico	41
Figura 2.17 – a) Reómetro de corte dinâmico b) pormenor do equipamento utilizado	41
Figura 2.18 – Valores da viscosidade complexa e das componentes elástica e imaginária da rigidez, função da tensão de corte instalada	42

Figura 2.19 – Variação da viscosidade complexa com a frequência de aplicação do carregamento	45
Figura 2.20 – Câmara de envelhecimento de betumes RTFOT a) vista geral www.matest.com/en/Products/-1/Macro-Category/rolling-thin-film-oven b) pormenor www.gecil.com/index.php?pageID=54	46
Figura 2.21 – Estufa para ensaio de envelhecimento de betumes (TFOT), www.lin-tech.ch/english/tf257000eng.html da.....	47
Figura 2.22 – Equipamento para o envelhecimento de betume pelo método RFT www.matest.com/en/Products/----1/Macro-Category/bituminous-binders-determination-of-the-resistance-of-hardening-rotating-flask-test-rft-me/b065-rotary-evaporation-apparatus	47
Figura 2.23 – Equipamento de envelhecimento PAV	49
Figura 2.24 – Equipamento de envelhecimento RCAT, www.normalab.com/index.php/en/detail-produit-en?idprod=167&r=rcat#page_detail_produit	49
Figura 2.25 – a) Ensaio Fraass, www.directindustry.com/industrial-manufacturer/test-device-75330.html b) Ensaio de penetração, www.priasphalt.com/testingandspecifications.aspx?id=733 c) Ensaio temperatura anel e bola, www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/pavelab-automatic-ring-and-ball-apparatus.php	51
Figura 2.26 – Ensaio viscosidade cinemática, www.khushbooscientific.com/Oil-Petroleum-Bitumen-Concrete-Test-Instruments.htm	52
Figura 2.27 – Ensaio ponto de inflamação, www.anton-paar.com/no-en/products/details/cla-5/volatility/	52

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Esquema de central de produção de filer comercial	70
Figura 3.2 – Forno vertical utilizado na produção de cal viva, www.lhoist.com/pt_pt/transformar-pedra-em-cal-ou-cal-dolom%C3%ADtica	72
Figura 3.3 – Cal viva em diferentes granulometrias, www.lhoist.com/pt_pt/refinar-cal-para-obter-produtos-finais	73
Figura 3.4 – Cal hidratada vista em microscópio eletrónico de varrimento (SEM) www.bitume.info/articlespdf/347.pdf	74
Figura 3.5 – Fornos de produção de cal hidráulica www.secilargamassas.pt/en/natural-hydraulic-lime/maceira-factory	81
Figura 3.6 – Fabrica de produção de cimento Portland www.secil.pt/default.asp?pag=outao	83
Figura 3.7 – Imagem obtida no SEM de um mástique com cal hidratada	86
Figura 3.8 – Imagem obtida no SEM de um mástique com filer calcário.....	86
Figura 3.9 – Microscópio eletrónico de varrimento (MEV) en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope	86

Figura 3.10 – Princípios para definir o diâmetro das partículas de um filer, adaptada de Rawle, 2002.....	87
Figura 3.11 – Peneiração por jato de ar: a) equipamento www.retsch.com/products/sieving/sieve-shakers/as-200-jet/function-features/ b) esquema de funcionamento www.labopolis.com/English/lab-products/Air-Jet-Machine	88
Figura 3.12 – Sedimentação por raios X a) esquema do princípio de funcionamento www.micromeritics.com/Product-Showcase/SediGraph-III-Plus/SediGraph-Method-Overview.aspx b) equipamento www.directindustry.com/prod/micromeritics/product-30867-204800.html	90
Figura 3.13 – Esquema de funcionamento da difração laser a) via seca, adaptado de França & Couto (2007) b) via húmida www.quimicandovzp.com.br/2014/07/analise-microgranulometrica.html	91
Figura 3.14 – Esquema do efeito de uma luz incidente numa partícula.	92
Figura 3.15 – Imagens de luz difratada função do diâmetro das partículas, adaptado de Virden, 2015.....	93
Figura 3.16 – Equipamento de difração laser (por via seca e por via húmida) www.micronscientific.com.au/analysis-technology-products/particle-size-analysis/malvern-instruments/particle-size-analysis-using-the-malvern-mastersizer-3000	95
Figura 3.17 – Equipamento de difração laser por via húmida www.lmsscientific.com/products.php?prod_name=particle-size-analyser-laser-diffraction	95
Figura 3.18 – Equipamento DLS Dynamic Light Scattering www.malvern.com/en/products/product-range/zetasizer-range/zetasizer-microv/default.aspx).	97
Figura 3.19 – Microscopia - método estático www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/ImageAnalysis.html	98
Figura 3.20 – Microscopia - método dinâmico www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/ImageAnalysis.html	98
Figura 3.21 – Equipamento de microscopia - método estático www.malvern.com/en/products/product-range/morphologi-range/default.aspx	98
Figura 3.22 – Equipamento de microscopia - método dinâmico www.retsch-technology.com/rt/products/dynamic-image-analysis/camsizer-p4/function-features/	99
Figura 3.23 – Picnómetro de 50 ml de capacidade e volumínímetro Chatelier.....	101
Figura 3.24 – Picnómetro de hélio www.powderhandling.com.au/articles/pycnometer-accupyc-ii-1340-for-powder-process-applications	102
Figura 3.25 – Ensaio de determinação da massa volúmica aparente do filer em querosene.....	102
Figura 3.26 – Equipamento para o ensaio dos vazios do filer seco compactado.....	103
Figura 3.27 – Ensaio de determinação do número de betume de um filer	104
Figura 3.28 – Ensaio de variação de temperatura anel e bola.	105
Figura 3.29 - Temperatura anel e bola para diferentes mástiques com diferentes percentagens em filer, adaptado de Cramer <i>et al.</i> , 2001.....	106
Figura 3.30 – Equipamento para avaliação da superfície específica, método Blaine.....	107

Figura 3.31 – Equipamento de análise superficial de partículas www.microtrac.com/belsorp-mini-ii/#.ViGbXNKrTIV.....	108
Figura 3.32 – Fases do ensaio de solubilidade em água, adaptado de Santos, 2013.....	110
Figura 3.33 – Ensaio do azul de metileno: a) equipamento b) resultado do ensaio da mancha...	110
Figura 3.34 – Equipamento utilizado na determinação do pH.....	111
Figura 3.35 – Fases do ensaio de suscetibilidade à água.	112
Figura 3.36 – Preparação de provetes para ensaios XFR.....	113
Figura 3.37 – Equipamento utilizado nos ensaios XFR	113

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Fenómenos associados à perda de coesão das misturas betuminosas, adaptado de McCann & Sebaaly, 2001	120
Figura 4.2 – Tipos de rotura: coesiva e adesiva	125
Figura 4.3 – Microscópio de força atómica (AFM),www.imc.cas.cz/en/umch/o_membr_eq.htm	130
Figura 4.4 – Esquema da intromissão da água na ligação entre o mástique betuminoso e o agregado a) antes do descolamento b) após o descolamento.....	132
Figura 4.5 – Esquemas representativos de diferentes ângulos de contacto entre um líquido e um sólido: a) igual a 90 ° b) superior a 90 ° c) inferior a 90.....	133
Figura 4.6 – Esquema das relações volumétricas dos componentes do mástique betuminoso....	136
Figura 4.7 – Esquema sobre a influência de uma partícula de filer no betume que a envolve, adaptado de Bahia, 2011.....	139
Figura 4.8 – Rigidez relativa do mástique em função da concentração do filer, adaptado de Bahia, 2011.	141
Figura 4.9 – Equipamento pneumático para ensaios “pull-off”: a) modelo analógico b) modelo digital (http://semicro.org/collections/patti)	146
Figura 4.10 – Peça para arranque utilizada em ensaios “pull-off” de betumes, adaptado de AASHTO, 2011.....	147
Figura 4.11 – Configuração de todo o equipamento necessário para os ensaios “pull-off” de betumes, adaptado de AASHTO, 2011.....	147
Figura 4.12 – Equipamento hidráulico utilizado nos ensaios “pull-off” realizados neste trabalho.	148
Figura 4.13 – Peça metálica utilizada nos ensaios “pull-off” realizados neste trabalho.....	149

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Agitador horizontal rotativo utilizado nos ensaios de afinidade agregado/betume (Teixeira & Azevedo, 2007).....	160
Figura 5.2 – Provete de ensaio de afinidade agregado/betume: a) após 6 h de ensaio b) após 24 h de ensaio (Teixeira & Azevedo, 2007).	161
Figura 5.3 – Equipamento para a realização do ensaio de tração indireta (Galán <i>et al.</i> , 2012)....	171
Figura 5.4 – Esquema do carregamento aplicado no ensaio de avaliação da rigidez pelo método tração indireta EN 12697-26 (CEN, 2012).	171
Figura 5.5 – Esquema de carregamento do ensaio de flexão em quatro pontos, segundo Teixeira (2000).....	172
Figura 5.6 – Esquema de carregamento pulsatório no ensaio de fadiga de uma mistura betuminosa em tração indireta, adaptado de EN 12697-26 (CEN, 2012)	175
Figura 5.7 – Lei de fadiga de uma mistura betuminosa.....	176
Figura 5.8 – Equipamento servo-pneumático para aplicação de um carregamento cíclico em quatro pontos (Teixeira, 2000).	177
Figura 5.9 – Equipamento “Wheel tracking” (www.teiseint.com/principle/cooper).....	179
Figura 5.10 – Profundidade de rodeira função do número de ciclos de carregamento.....	180

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres	188
Figura 6.2 - Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres FRG e FRR.....	188
Figura 6.3 - Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres FRC.	188
Figura 6.4 - Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres FC.....	188
Figura 6.5 – Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres Chda, Chca e Cem	189
Figura 6.6 – Exemplo de uma curva granulométrica de um filer (vermelho) e respetivo histograma de distribuição (azul).....	190
Figura 6.7 – Parâmetros D [3;2] e D [4;3] para uma distribuição granulométrica do tipo normal.....	191
Figura 6.8 - Lupa utilizada na observação dos fileres.....	195
Figura 6.9 - Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG 1 a) e b) e do filer FRG 1c) e d).....	196
Figura 6.10 – Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG 2 a) e b) e do filer FRG 2 c) e d).	196
Figura 6.11 – Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG 5 a) e b) e do filer FRG 5 c) e d).....	197

Figura 6.12 – Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG 7 a) e b) e do filer FRG 7 c) e d).....	197
Figura 6.13 – Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRC 1 a) e b) e do filer FRC 1 c) e d).....	198
Figura 6.14 – Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRC 5 a) e b) e do filer FRC 5 c) e d)	199
Figura 6.15 – Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRC 6 a) e b) e do filer FRC 6 c) e d)	199
Figura 6.16 – Imagens da fração 0/0,125 mm do filer comercial FC 1.....	200
Figura 6.17 – Imagens da fração 0/0,125 mm do filer Chca.....	201
Figura 6.18 – Imagens da fração 0/0,125 mm do filer Cem	202
Figura 6.19 – Imagens do filer Chda	202
Figura 6.20 – Voluminímetro Chatelier	203
Figura 6.21 – Massa volúmica dos fileres e agregados que lhes deram origem.....	205
Figura 6.22 – Valores da massa volúmica aparente dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem.....	208
Figura 6.23 – Valores dos vazios de Rigden dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem	211
Figura 6.24 - Valores do número de betume dos fileres e da fração0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem.....	215
Figura 6.25 - Variação da temperatura anel e bola dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem.....	218
Figura 6.26 – Valores da superfície específica dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem	220
Figura 6.27 - Valores do pH dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem.....	224
Figura 6.28 - Valores de Si dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem	227
Figura 6.29 - Valores de Ca dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem	227
Figura 6.30 - Relação entre os valores dos vazios de Rigden e do número de betume dos fileres	231
Figura 6.31 - Relação entre os valores da temperatura anel e bola obtidos de forma experimental e analiticamente.....	232
Figura 6.32 - Relação entre os valores de variação da temperatura anel e bola e os vazios de Rigden.	233
Figura 6.33 - Produção laboratorial dos mástiques betuminosos ensaiados (Miranda, 2014)	236

Figura 6.34 - Viscosidade dinâmica dos betumes 35/50 e PMB 45/80-60 função da temperatura.....	241
Figura 6.35 - Viscosidade dinâmica do betume 35/50 e mástiques para $(f/m)v = 0,2$	242
Figura 6.36 - Viscosidade dinâmica do betume 35/50 e mástiques para $(f/m)v = 0,3$	243
Figura 6.37 - Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com betume 35/50 para $(f/m)v = 0,2$	244
Figura 6.38 - Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com betume 35/50 para $(f/m)v = 0,3$	244
Figura 6.39 - Viscosidade dinâmica do betume PMB 45/80-60 e mástiques respectivos para $(f/m)v = 0,2$	246
Figura 6.40 - Viscosidade dinâmica do betume PMB 45/80-60 e mástiques respectivos para $(f/m)v = 0,3$	246
Figura 6.41 - Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com PMB 45/80-60 para $(f/m)v = 0,2$	247
Figura 6.42 - Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com PMB 45/80-60 para $(f/m)v = 0,3$	247
Figura 6.43 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com Chda função da concentração.....	249
Figura 6.44 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com Chca função da concentração.....	249
Figura 6.45 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com Cem função da concentração	249
Figura 6.46 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FC1 função da concentração.....	250
Figura 6.47 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FRG5 função da concentração	250
Figura 6.48 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FGR7 função da concentração	250
Figura 6.49 - Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FRC5 função da concentração	251
Figura 6.50 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com Chda função da concentração.....	251
Figura 6.51 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com Chca função da concentração.....	251
Figura 6.52 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com Cem função da concentração.....	252
Figura 6.53 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FC1 função da concentração.....	252
Figura 6.54 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FRG5 função da concentração.....	252
Figura 6.55 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FRG7 função da concentração	253
Figura 6.56 - Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FRC5 função da concentração	253
Figura 6.57 - Temperatura anel e bola do betume 35/50 e mástiques respectivos.....	258
Figura 6.58 - Temperatura anel e bola do betume PMB 45/80-60 e mástiques respectivos	259

Figura 6.59 - Relação entre as temperaturas anel e bola do betume 35/50 e dos mástiques respetivos, após e antes envelhecimento	260
Figura 6.60 - Relação entre as temperaturas anel e bola do betume PMB 45/80-60 e mástiques respetivos, após e antes envelhecimento.....	261
Figura 6.61 - Diagrama de Black do betume 35/50.....	264
Figura 6.62 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 Chda	264
Figura 6.63 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 Chca.....	264
Figura 6.64 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 Cem.....	265
Figura 6.65 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FC1.....	265
Figura 6.66 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FRC1.....	265
Figura 6.67 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FRG1.....	266
Figura 6.68 - Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FRG5.....	266
Figura 6.69 - Diagrama de Black do betume PMB 45/80-60.....	266
Figura 6.70 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Chda.....	267
Figura 6.71 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Chca.....	267
Figura 6.72 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Cem.....	267
Figura 6.73 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FC1.....	268
Figura 6.74 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRC1.....	268
Figura 6.75 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG1.....	268
Figura 6.76 - Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG5.....	269
Figura 6.77 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do betume 35/50.....	270
Figura 6.78 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 Chda.....	270
Figura 6.79 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 Chca.....	270
Figura 6.80 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 Cem.	271
Figura 6.81 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FC1.....	271
Figura 6.82 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FRC1.....	271
Figura 6.83 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FRG1.....	272
Figura 6.84 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FRG5.....	272
Figura 6.85 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do betume PMB 45/80-60.....	272
Figura 6.86 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Chda.....	273
Figura 6.87 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Chca.....	273
Figura 6.88 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Cem	273
Figura 6.89 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FC1.....	274

Figura 6.90 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRC1.....	274
Figura 6.91 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG1.....	274
Figura 6.92 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG5.....	275
Figura 6.93 - Isócronas da rigidez do betume 35/50 e respetivos mástiques para a frequência de 10 Hz.....	275
Figura 6.94 - Isócronas da rigidez do betume PMB 45/80-60 e respetivos mástiques para a frequência de 10 Hz.....	275
Figura 6.95 - Isotérmicas do betume 35/50 e mástiques respetivos.	276
Figura 6.96 - Isotérmicas do betume PMB 45/80-60 e mástiques respetivos.....	276
Figura 6.97 – Diagramas de Black dos betumes 35/50 e PMB 45/80-60.....	278
Figura 6.98 - Identificação do tipo de rotura observado nos ensaios de tração direta.....	280
Figura 6.99 - Resultados ensaios “pull-off”, RAFRG, betume 35/50 e respetivos mástiques (D).....	282
Figura 6.100 - Resultados ensaios “pull-off”, RAFRC, betume 35/50 e respetivos mástiques (D).....	282
Figura 6.101- Resultados ensaios “pull-off”, RAFRG, betume 35/50 e respetivos mástiques (D) e (W).....	282
Figura 6.102 - Resultados ensaios “pull-off”, RAFRC, betume 35/50 e respetivos mástiques (D) e (W).....	283
Figura 6.103 - Resultados ensaios “pull-off”, RAFRG, PMB 45/80-60 e respetivos mástiques (D) e (W).....	283
Figura 6.104 - Resultados ensaios “pull-off”, RAFRC, PMB 45/80-60 e respetivos mástiques (D) e (W)	283
Figura 6.105 – Relação entre os valores da variação da temperatura anel e bola dos fileres e a viscosidade dos mástiques com betume 35/50 para as temperaturas de 120, 140 e 170°C	287
Figura 6.106 – Relação entre os valores da variação da temperatura anel e bola dos fileres e a viscosidade dos mástiques com betume PMB 45/80-60 para as temperaturas de 120, 140 e 170 °C.....	287
Figura 6.107 - Distribuição granulométrica das misturas de agregados utilizadas nas misturas betuminosas AC 14 (vermelho) e nas misturas PA 12,5 (azul).....	290
Figura 6.108 - Provetes da mistura M5 com filer Chda após ensaio Cantabro.....	292
Figura 6.109 - Resultados dos ensaios Cantabro para as misturas produzidas com um único filer.....	293
Figura 6.110 - Resultados dos ensaios Cantabro para misturas produzidas com misturas de fileres.....	293

Figura 6.111 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para misturas produzidas com agregados graníticos.....	295
Figura 6.112 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para misturas produzidas com agregados calcários.....	296
Figura 6.113 - Preparação de placas de mistura betuminosa.....	297
Figura 6.114 - Representação gráfica da profundidade total de rodeira obtida nos ensaios de pista.....	298
Figura 6.115 - Representação gráfica da percentagem de rodeira obtida nos ensaios de pista.....	298
Figura 6.116 - Representação gráfica do declive máximo da rodeira obtido nos ensaios de pista.....	298
Figura 6.117 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com Chda.....	301
Figura 6.118 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com Chca.....	301
Figura 6.119 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com FC1.....	301
Figura 6.120 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com FRG5.....	302
Figura 6.121 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com Chda + FRG5.....	302
Figura 6.122 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M2 com Chda.....	302
Figura 6.123 - Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M2 com Chca.....	303
Figura 6.124 - Isócronas da rigidez das misturas betuminosas ensaiadas para uma frequência de 10 Hz.....	303
Figura 6.125 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com Chda	304
Figura 6.126 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com Chca	304
Figura 6.127 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com FC1.....	304
Figura 6.128 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com FRG5.....	305
Figura 6.129 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com Chda+FRG5.....	305
Figura 6.130 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M2 com Chda.	305
Figura 6.131 - Lei de fadiga da mistura betuminosa M2 com Chca.....	306
Figura 6.132 - Lei de fadiga das misturas betuminosas ensaiadas.....	306

Nota: Os acessos às referências indicadas de sites da internet foram confirmados em 2015.11.11

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Grupos componentes do betume.....	15
Tabela 2.2 – Expressões associadas ao comportamento viscoelástico de um betume	32
Tabela 2.3 – Diâmetros dos pratos do reómetro de corte dinâmico	41
Tabela 2.4 – Requisitos dos betumes de pavimentação segundo o IP, S.A.(Estradas de Portugal, 2012).....	52
Tabela 2.5 – Valores possíveis do índice de penetração para os betumes 35/50 e 50/70.....	54
Tabela 2.6 – Requisitos do betume duro 10/20 segundo o IP, S.A. (Estradas de Portugal, 2012) .	56
Tabela 2.7 – Especificações dos betumes modificados (IPQ, 2013).....	59
Tabela 2.8 – Especificações dos betumes borracha (IPQ, 2013).....	62

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Principais propriedades dos fileres (adaptado de NCHRP, 2010).....	67
Tabela 3.2 – Origens e características gerais dos fileres recuperados utilizados no estudo.....	69
Tabela 3.3 – Origens e características gerais dos fileres comerciais naturais utilizados no estudo	71
Tabela 3.4 – Composição química aproximada da cal hidratada	75
Tabela 3.5 – Utilização da cal hidratada.....	76
Tabela 3.6 – Valores de referência da superfície específica de materiais granulares.....	106
Tabela 3.7 – Características dos fileres e metodologias associadas para a sua quantificação.....	114

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Correspondência entre os mecanismos de rotura e as teorias da adesão (Kiggundu & Roberts, 1988)	135
---	-----

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Propriedades a observar pelas misturas betuminosas do tipo betão betuminoso (AC) e misturas betuminosas drenantes (PA)	155
Tabela 5.2 – Categorias <i>ITSR</i> previstas na EN 13108-1 (CEN, 2006).....	165
Tabela 5.3 – Categorias da rigidez de misturas betuminosas, adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006).....	170

Tabela 5.4 – Categorias da resistência à fadiga de misturas betuminosas, adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)	177
Tabela 5.5 – Categorias da percentagem de profundidade de rodeira, PRDAIR , adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)	181
Tabela 5.6 – Categorias da taxa de deformação, WTSRAIR , adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)	181

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Resultados das análises granulométricas dos fileres por peneiração a jato de ar.....	185
Tabela 6.2 – Resultados das análises granulométricas dos fileres por peneiração via seca, via húmida e jato de ar	186
Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios de difração laser da fração 0/0,125 mm dos fileres	187
Tabela 6.4 - Valores de Cu, Cc, MF, Cg e D [3;2] da fração 0/0,125 mm dos fileres.....	193
Tabela 6.5 - Valores da massa volúmica da fração 0/0,125 mm dos fileres	204
Tabela 6.6 - Valores da massa volúmica da fração 0/0,125 mm dos agregados	204
Tabela 6.7 - Valores da massa volúmica aparente e Cc da fração 0/0,125 mm dos fileres	207
Tabela 6.8 - Valores da massa volúmica aparente da fração 0/0,125 mm dos agregados	207
Tabela 6.9 - Categorias dos vazios de Rigden, adaptada da EN 13043 (CEN, 2002)	210
Tabela 6.10 - Valores dos vazios de Rigden dos fileres	210
Tabela 6.11 - Valores dos vazios de Rigden da fração 0/0,125 mm dos agregados	210
Tabela 6.12 - Valores dos vazios de Rigden para diferentes misturas de fileres	211
Tabela 6.13 - Categorias do número de betume, adaptada da EN 13043 (CEN, 2002).....	213
Tabela 6.14 - Valores do número de betume dos fileres.....	214
Tabela 6.15 - Valores do número de betume dos agregados que deram origem aos fileres	214
Tabela 6.16 - Categorias para a variação da temperatura anel e bola, adaptada da EN 13043 (CEN, 2002).....	216
Tabela 6.17 - Valores da variação de temperatura anel e bola dos fileres	217
Tabela 6.18 - Variação da temperatura anel e bola da fração 0/0,125 mm de alguns agregados que deram origem a fileres recuperados.....	217
Tabela 6.19 - Variação da temperatura anel e bola de misturas de fileres.....	217
Tabela 6.20 - Valores da superfície específica (Blaine) dos fileres.....	219
Tabela 6.21 - Valores da superfície específica (Blaine) dos agregados que deram origem aos fileres recuperados.....	220
Tabela 6.22 - Valores do pH da dispersão dos fileres em água.....	223
Tabela 6.23 - Valores do pH da dispersão dos agregados em água.....	224
Tabela 6.24 - Valores dos elementos Ca e Si presentes nos fileres	226

Tabela 6.25 - Valores dos elementos Ca e Si dos agregados que deram origem aos fileres recuperados	226
Tabela 6.26 – Número de ensaios realizados aos fileres selecionados no estudo.....	228
Tabela 6.27 - Principais características da fração 0/0,125 mm dos fileres ensaiados.....	229
Tabela 6.28 - Valores da temperatura anel e bola obtidos de forma experimental e analiticamente	232
Tabela 6.29 - Propriedades gerais dos betumes 35/50 e PMB 45/80-60.....	235
Tabela 6.30 - Valores das diferentes concentrações de filer utilizadas na produção dos mástiques....	238
Tabela 6.31 - Valores da viscosidade do betume 35/50 e mástiques produzidos com este betume.	240
Tabela 6.32 - Valores da viscosidade do betume PMB 45/80-60 e mástiques produzidos com este betume.....	240
Tabela 6.33 - Valores do fator ϕ_m para os fileres.....	248
Tabela 6.34 - Temperatura anel e bola dos betumes para diferentes estados de envelhecimento	257
Tabela 6.35 - Temperatura anel e bola do betume 35/50 e respetivos mástiques.	258
Tabela 6.36 - Temperatura anel e bola do betume PMB 45/80-60 e respetivos mástiques.....	258
Tabela 6.37 – Relação entre as temperaturas anel e bola dos mástiques e do betume 35/50.....	259
Tabela 6.38 – Relação entre as temperaturas anel e bola dos mástiques e do betume PMB 45/80-60.....	260
Tabela 6.39 - Tensão de rotura por tração (MPa) do betume 35/50 e mástiques respetivos (conservação ao ar)	280
Tabela 6.40 - Tensão de rotura por tração (MPa) do betume 35/50 e mástiques respetivos (conservação em água)	281
Tabela 6.41 - Tensão de rotura por tração (MPa) do betume PMB 45/80-60 mástiques respetivos.....	281
Tabela 6.42 – Número de ensaios realizados aos betumes e mástiques betuminosos.....	286
Tabela 6.43 – Valores dos coeficientes da correlação linear entre a variação da temperatura anel e bola dos fileres e a viscosidade dos mástiques.....	288
Tabela 6.44 – Tipos e designações das misturas betuminosas ensaiadas.....	289
Tabela 6.45 - Formulação das misturas betuminosas ensaiadas.....	290
Tabela 6.46 - Propriedades dos agregados utilizados nas misturas betuminosas ensaiadas.....	291
Tabela 6.47 - Resultados dos ensaios Cantabro.....	292
Tabela 6.48 - Resultados dos ensaios de sensibilidade à água.....	295
Tabela 6.49 - Valores obtidos nos ensaios de “ <i>Wheel tracking</i> ”.....	297
Tabela 6.50 - Valores obtidos nos ensaios de rigidez.....	300

SIMBOLOGIA

O significado das siglas e dos símbolos utilizados neste trabalho apresenta-se explicado ao longo do texto, pelo menos da primeira vez que são referidos. Dado que muitos desses símbolos e siglas são utilizados repetidamente ao longo do texto, e por razões práticas, considerou-se conveniente apresentar aqui apenas uma lista resumida, identificando o significado dos mais relevantes.

S.1 – Alfabeto latino

C_c	Concentração crítica do filer no mástique betuminoso
D_e	Número de Deborah
E	Módulo de elasticidade
E^*	Módulo de rigidez complexo
f	Frequência de aplicação da carga
G	Módulo de corte
G^*	Módulo de corte complexo
I_P	Índice de penetração de um betume
P	Penetração de um betume
$t_{R\&B}$	Temperatura anel e bola

S.2 – Alfabeto grego

γ	Taxa de corte
δ	Extensão de corte ou tangencial
ε	Extensão normal, de tração ou de compressão
η	Viscosidade dinâmica
η^*	Viscosidade complexa
η_c	Viscosidade cinemática
η_r	Viscosidade relativa do mástique betuminoso
η_0	Viscosidade a taxa de corte zero
η_∞	Viscosidade a taxa de corte infinita
θ	Ângulo de contacto entre um líquido e um sólido
ρ	Massa volúmica
σ	Tensão normal, de tração ou de compressão
τ	Tensão de corte ou tangencial
ν	Coefficiente de Poisson
ϕ	Ângulo de fase
ϕ_v	Percentagem da fração volumétrica do filer no mástique betuminoso
ω	Período ou frequência angular

Siglas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC	Asphalt Concrete
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBS	Bitumen Bond Strength
BRRC	Belgium Road Research Center
CEN	European Committee for Standardization
CICCOPN	Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte
CT	Comissão Técnica Portuguesa
DSR	Dynamic Shear Rheometer
EN	European Norm
EuLA	European Lime Association
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IP, S. A.	Infraestruturas de Portugal, S. A.
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	International Standard Organization
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LGMC	Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do CICCOPN
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NLA	National Lime Association
NLT	Norma de Ensayo del Laboratorio del Transporte
NP	Norma Portuguesa
PA	Porous Asphalt
PAV	Pressure Ageing Vessel
PMB	Polymer Modified Bitumen
RCAT	Rotating Cylinder Ageing Test
RFT	Rotating Flask Test
RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
SARA	Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene
SEM	Scanning Electron Microscope
SETRA	Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Mastic Asphalt
TC	Technical Committee
TFOT	Thin-Film Oven Test
ZSV	Zero Shear Viscosity

1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As misturas betuminosas utilizadas em camadas de pavimentos devem possuir características adequadas, de forma a garantir ao pavimento onde se inserem propriedades fundamentais, tais como: estabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência (camada de desgaste), impermeabilidade (exceto algumas misturas constituintes da camada de desgaste) e durabilidade. Devem, ainda, apresentar adequada trabalhabilidade durante a sua aplicação e condições que permitam a reciclagem dos materiais quando atingido o fim de vida da mistura betuminosa.

Uma das patologias mais correntes nas misturas betuminosas, constituintes das camadas superficiais dos pavimentos, está relacionada com a durabilidade da camada de desgaste e diz respeito ao despreendimento dos materiais constituintes. Tal facto conduz à formação de desagregações, covas e peladas, com a consequente perda de valor patrimonial e de segurança rodoviária para a via em que se insere o pavimento.

Esta preocupação é tanto maior quanto mais gravosas forem as condições de pluviosidade e geográficas (planalto, serra, etc.) do local, onde o pavimento se insere, e quanto mais agressivas as condições do tráfego, quer quanto às cargas por eixo, quer quanto ao efeito de corte produzido por esforços tangenciais, como os que se verificam em traçado em curva de raio reduzido, zonas de travagem, de aceleração e desaceleração.

Estas questões colocam-se com particular preocupação no caso de misturas betuminosas abertas, ou seja, misturas com índice de vazios superior a 10%, onde os agregados de maior dimensão não se encontram contraventados por uma matriz mais forte de agregados finos e betume, como acontece nas misturas betuminosas densas.

Esta situação é agravada, no caso da existência de água na mistura betuminosa, de forma quase permanente, como acontece nos pavimentos drenantes (misturas betuminosas abertas com índice de vazios superior a 30%) com fraca manutenção, pois potencia a emulsificação do betume e o seu consequente descolamento da superfície do agregado, a que se segue o desprendimento e a formação de covas e peladas na camada. Esse descolamento, originado pela perda de adesão ligante/agregado, pode também ficar a dever-se ao aumento de tensões, verificado pelo congelamento da água existente na interface agregado/betume, consequência das temperaturas ambiente negativas (*Dony et al., 2012*).

A água pode, também, atingir as misturas betuminosas constituintes das camadas inferiores, podendo observar-se igualmente a diminuição ou mesmo a perda total da adesão agregado/betume nestas camadas, com a consequente redução da capacidade de carga da camada e de toda a estrutura do pavimento.

Durante o processo de mistura dos vários componentes da mistura betuminosa, dá-se o contacto entre o agregado e o mástique betuminoso, verificando-se por parte dos agregados, uma maior adsorção dos compostos polares do ligante, constituídos por moléculas maiores e de maior peso molecular do que dos compostos menos polares ou apolares (*Curtis, 1992*). No entanto, algumas dessas moléculas polares são facilmente removidas da superfície do agregado pela presença da água. Fenómenos que possam conduzir a alterações ao pH da superfície do agregado, fazendo subir o valor para condições fortemente básicas, podem em muitos casos, melhorar a afinidade do agregado ao ligante.

A capacidade de adsorção do ligante, por parte do agregado, depende não só da composição do betume, mas também das características da superfície do agregado, como sejam, a composição química e a morfológica, nomeadamente a rugosidade, a superfície específica e a distribuição dos poros do agregado acessíveis à sua superfície (Curtis, 1992). A composição química do agregado é um aspeto essencial para a adsorção dos componentes do ligante e para a sua manutenção, mesmo em presença da água.

A existência de pó, na superfície do agregado, pode alterar as características químicas da superfície, dificultando, em alguns casos, e melhorando, noutros, a afinidade do agregado ao betume.

Por outro lado, agregados siliciosos colocam, muitas vezes, questões de fraca adesividade agregado/betume. Estão, neste caso, os agregados graníticos de utilização corrente nas misturas betuminosas no norte do País.

Agregados que quimicamente contenham elementos como cálcio, magnésio, ferro e alumínio, são geralmente associados a agregados que apresentam elevada adesão ao ligante, enquanto que a presença de elementos como sódio e potássio, conduz a agregados com fraca afinidade ao betume. Enquanto que os sais de sódio são solúveis em água, acelerando o processo de degradação da mistura betuminosa em presença da água, os sais de cálcio são significativamente menos solúveis, pelo que a sua presença contribui para um aumento da resistência da mistura betuminosa ao desprendimento.

A utilização de misturas betuminosas fresadas no fabrico de misturas betuminosas tornou-se, desde há alguns anos, um assunto prioritário, como forma de contribuir para a sustentabilidade das obras de pavimentação. No entanto, a incorporação de misturas betuminosas fresadas com betumes demasiado envelhecidos coloca algumas questões técnicas, nomeadamente no que diz respeito à adesão entre os componentes novos e os reciclados.

Outra preocupação constante prende-se com a necessidade de produzir misturas betuminosas para as camadas de base dos pavimentos, mais resistentes ao fendilhamento por fadiga, aumentando a vida útil de toda a estrutura e reduzindo as manutenções a realizar.

Todos estes aspetos são objeto de muita investigação em vários países europeus e por todo o mundo, procurando encontrar componentes inovadores e novas formulações, que conduzam a misturas betuminosas com aumentos de desempenho nestas propriedades.

Há muito está provada a importância do mástique betuminoso, e consequentemente do filer utilizado como rigidificante do betume, na coesão das misturas, na adesão ligante agregado, bem como na rigidez das misturas betuminosas.

Uma mistura betuminosa é composta por três fases: fase sólida, constituída pelos agregados; fase líquida, mais ou menos viscosa função da temperatura, correspondente ao ligante betuminoso e a fase gasosa, representada pelos vazios preenchidos por ar. Hoje em dia, é praticamente consensual, que uma mistura betuminosa deve ser considerada como uma mistura de agregados envolvidos por um mástique betuminoso, devendo este material ser entendido como a mistura do ligante betuminoso com o filer.

Todo o fendilhamento verificado em camadas de misturas betuminosas de um pavimento, originado por fadiga ou por variações térmicas, tem início em microfissuras no mástique betuminoso, pelo que é da maior importância para o desempenho da mistura betuminosa, o estudo dos fileres, dos betume e a forma como estes dois materiais se misturam e interagem.

O conceito de mástique, como sendo o material que resulta da mistura do betume com as partículas finas do agregado, não é consensual no que diz respeito ao tamanho das partículas abaixo do qual se deve considerar fazerem parte do mástique betuminoso. A definição tem vindo a ser alterada com o tempo, sendo atualmente mais usual considerar todas as partículas sólidas dos agregados correspondentes à fração abaixo dos 2 mm como a fase sólida constituinte do mástique (*Silva, 2005*).

A diminuição do tamanho das partículas do filer e o aumento da irregularidade geométrica da superfície das partículas implicam o aumento da superfície específica e, consequentemente, o aumento da atividade do filer, ou seja, da magnitude das ações que se desenvolvem entre o filer e o betume.

As características mecânicas do mástique betuminoso, nomeadamente a sua rigidez e o ângulo de fase, afetam as características mecânicas da mistura betuminosa:

- as fendas de fadiga têm como origem microfissuras, que se desenvolvem originariamente no mástique betuminoso;
- as deformações plásticas são devidas ao movimento irreversível dos agregados grossos (sólidos) no mástique betuminoso (semissólido/semilíquido).

A influência do tipo de filer, no desempenho final da mistura betuminosa, não é uma matéria fácil. A prová-lo está o facto de um projeto de pesquisa sobre as metodologias de ensaio e definição de critérios de conformidade para os fileres, utilizados em misturas

betuminosas (*NCHRP, 2011*), realizado pela NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*), envolvendo três Universidades dos EUA e da África do Sul, ter sido iniciado em 2007 e só recentemente ter sido concluído no ano de 2011.

Na definição deste programa foram inicialmente estabelecidos dois objetivos fundamentais:

- identificar e desenvolver, se necessário, métodos de ensaio para a caracterização das propriedades físicas e químicas dos fileres e suas consequências no desempenho dos mástiques betuminosos e nas misturas betuminosas;
- propor especificações e associar critérios de aceitação para as características dos fileres, no sentido da sua contribuição na otimização do desempenho das misturas betuminosas.

Na realidade, são muitas as variáveis que influenciam o comportamento do filer no mástique betuminoso e este no comportamento geral da mistura betuminosa.

A pesquisa realizada permitiu concluir que o filer foi utilizado pela primeira vez em misturas betuminosas de forma intencional, na década de 70 do século XIX por DeSmedt no Estado de Washington D.C., conforme referido por *Richardson, 1905*, de modo a aumentar a durabilidade da mistura betuminosa.

Os primeiros estudos realizados ao mástique betuminoso datam do início do século XX, com o trabalho de *Richardson 1905*, tendo este autor concluído, já nessa altura, que o filer não tem apenas como objetivo o preenchimento de vazios do esqueleto mineral, defendendo também a existência de fenómenos físico-químicos no sistema betume/filer. Esta teoria foi confirmada por trabalhos posteriores como é o caso dos estudos desenvolvidos por *Warden et al., em 1959*.

Traxler em 1937 defendia três parâmetros fundamentais: qualquer que seja a concentração do filer num betume, a viscosidade relativa da suspensão é independente da viscosidade do betume; o efeito rigidificante do filer nem sempre é bem previsto com a percentagem de vazios no filer compactado e, só misturando o filer no betume e realizando ensaios com o mástique betuminoso resultante, é possível uma boa previsão do poder de rigidificação do filer no mástique betuminoso. O mesmo autor considerava o tamanho e a distribuição das partículas um aspeto fundamental, dada a influência destes dois parâmetros, não só na porosidade, mas também no tamanho dos poros do filer compactado. Estudos desenvolvidos ao longo dos anos têm reforçado as conclusões já estabelecidas de que não existe uma propriedade única dos fileres, cujo

resultado permita prever o comportamento do mástique betuminoso e da mistura betuminosa.

Os trabalhos de *Anderson & Goetz 1973*, permitiram concluir da importância das características físico-químicas dos fileres na capacidade deste material em contribuir para a rigidez do mástique, estabelecendo que fileres com elevada superfície específica, constituídos por partículas de superfície com elevada rugosidade e forte adsorção superficial, contribuem para uma maior rigidez do mástique betuminoso.

Mitchell & Lee 1939 defendiam que a dispersão do filer em querosene, avaliada através da baridade do filer disperso neste fluido, é um bom indicador das características rigidificantes do filer para baixas relações filer/betume.

O programa SHRP, "*Strategic Highway Research Program*" foi um estudo de investigação, autorizado pelo Congresso dos Estados Unidos da América, desenvolvido durante as duas últimas décadas do século passado, que pretendeu estabelecer e avaliar novas tecnologias, no sentido de combater a ruína precoce dos pavimentos betuminosos da rede de estradas do país. O objetivo principal do programa centrou-se na melhoria do desempenho das misturas betuminosas, fundamentalmente no que diz respeito à durabilidade, segurança e eficiência. Os investigadores envolvidos neste programa, estabeleceram, como fundamental, a definição de uma relação ponderal filer/ligante entre 0,6 e 1,2. Esta regra foi seguida por vários países europeus, nomeadamente Portugal. No entanto, existem vários parâmetros que afetam o poder rigidificante do filer e, consequentemente, o desempenho da mistura betuminosa, pelo que não é possível estabelecer uma regra comum para todos os tipos de filer.

Embora não existam estudos que claramente indiquem qual a influência do tipo de filer no comportamento da mistura betuminosa, a normalização europeia define uma série de ensaios para a caracterização do produto e as entidades responsáveis pela rede rodoviária de alguns países, como por exemplo Portugal, começam a colocar nos seus cadernos de encargos algumas exigências, que excluem a utilização de alguns fileres em misturas betuminosas, sem, no entanto, se conhecer quais os efeitos desses fileres no mástique e na mistura betuminosa. No caso Português, o novo caderno de encargos do IP,S.A., Infraestruturas de Portugal, capítulos 14.03 (*Estradas de Portugal, S.A. 2012*) e 15.3 (*Estradas de Portugal, S.A. 2009*), abandonou a fixação de um intervalo para a relação em massa filer/betume, tendo decidido proibir a utilização de alguns tipos de fileres, definir valores limites para a percentagem de vazios do filer seco compactado

e fixar uma relação volumétrica filer/betume ótima, calculada a partir dos valores dos vazios do filer seco compactado e da variação da temperatura anel e bola.

Outros países como por exemplo Espanha (*Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2014*) optaram por definir parâmetros limites para algumas características do filer e fixar intervalos para a relação ponderal filer/ligante. Já França (Setra, 2008) optou por definir valores limites para algumas propriedades do filer, não especificando, no entanto, qualquer intervalo para a relação filer/betume a utilizar nas misturas betuminosas.

Apesar de realizada muita investigação sobre estas matérias, ainda não existem, atualmente, estudos conclusivos sobre a importância das características do filer no desempenho das misturas betuminosas. Muitos estudos apontam para a necessidade de definir parâmetros para estabelecer adequado comportamento quer para o filer quer para o mástique betuminoso, mas nenhum deles estabelece correspondência direta entre as características dos fileres e dos mástiques betuminosos, com o desempenho final das misturas betuminosas.

1.2. Objetivos

Pretende este estudo, contribuir para o avanço no conhecimento no que diz respeito às propriedades físicas e químicas dos fileres, analisando de que modo as características do filer, a quantidade deste componente utilizada no fabrico das misturas betuminosas e a relação ponderal filer/betume, influenciam as propriedades das misturas betuminosas e o desempenho destas misturas nas camadas dos pavimentos flexíveis. Procura-se, assim, definir quais as características dos fileres mais relevantes, cuja quantificação se torna imprescindível realizar, quando se procede ao estudo de formulação de uma mistura betuminosa.

Foram então estabelecidas várias fases para o trabalho:

- ✓ recolha de bibliografia nacional e internacional existente, nomeadamente de trabalhos semelhantes já realizados, de modo a definir de forma criteriosa toda a parte laboratorial a desenvolver, selecionando os métodos de ensaios e as metodologias de ensaio mais adequadas;
- ✓ seleção e recolha de amostras dos vários materiais necessários à execução da parte experimental:

- vários tipos de fileres, naturais e artificiais, nomeadamente aqueles que apresentam maior utilização em Portugal;
 - agregados finos que deram origem aos fileres recuperados de central;
 - agregados de diferentes origens geológicas para o fabrico de misturas betuminosas;
 - blocos de rocha provenientes das pedreiras onde foram produzidos os agregados;
 - dois betumes de pavimentação, um puro e um outro modificado.
- ✓ quantificar laboratorialmente as propriedades mais relevantes para um número alargado de fileres artificiais e naturais de várias origens geológicas. Na realização dos ensaios foram sempre consideradas preferencialmente as metodologias europeias, sempre que existentes, pretendendo-se avaliar a adequabilidade dessas metodologias aos fileres utilizados em Portugal e estabelecer valores típicos de referência, a utilizar na definição de requisitos de cadernos de encargos;
 - ✓ avaliar a existência de propriedades dependentes de outras, procurando encontrar correlações entre elas, de modo a obter relações que permitam estimar o valor de determinada propriedade a partir do conhecimento de uma outra, evitando não só a necessidade de quantificar essas propriedades, ou eliminando-as para evitar a sobreespecificação de propriedades;
 - ✓ seleccionar alguns dos fileres estudados e quantificar as propriedades mais relevantes para os mástiques produzidos com esses fileres e com os dois tipos de betumes. Como os ensaios sobre os mástiques são algo complexos e morosos, houve necessidade de restringir o número de mástiques a estudar, procurando-se, contudo, que os resultados obtidos, permitissem entender de que forma a origem e dosagem do filer afeta as propriedades do mástique betuminoso. Foi também nesta fase que se procurou estudar o efeito do envelhecimento do betume, por se entender mais simples e prático este estudo ao nível do mástique betuminoso e não na fase do estudo das misturas betuminosas;
 - ✓ estudar as possíveis correlações entre as diferentes propriedades quantificadas nos vários mástiques produzidos e os fileres correspondentes, observando-se a existência de valores de tendência de acordo com o tipo de filer e betume utilizado. Definir leis que permitam antever o comportamento de um mástique tendo por base o tipo de componentes e sua dosagem relativa;

- ✓ produzir diferentes misturas betuminosas, selecionando alguns dos mástiques estudados, restringindo, assim, de novo o número de fileres inicialmente utilizados;
- ✓ definir e quantificar as propriedades das misturas betuminosas mais diretamente dependentes das características do mástique, selecionando os métodos de ensaio mais adequados;
- ✓ analisar os diferentes comportamentos obtidos, procurando estabelecer correlações com o desempenho das misturas betuminosas nas camadas do pavimento;
- ✓ por fim, estabelecer critérios para aceitação do material filer e sua dosagem na mistura betuminosa, tendo em conta o tipo de filer e de betume utilizados.

1.3. Estrutura e conteúdo

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, procurando cada um deles uma abordagem seletiva de matérias, tendo havido a preocupação de os estruturar de forma a permitir a leitura de qualquer um dos capítulos, sem necessidade de recorrer à leitura dos restantes.

A estrutura do trabalho fica assim definida:

- ✓ **Capítulo 1 | Introdução**

Enquadramento do tema e análise ao propósito do trabalho com definição dos grandes objetivos a cumprir.

- ✓ **Capítulo 2 | Betumes para misturas betuminosas**

Apresentação dos vários tipos de betumes, analisando a composição e o comportamento reológico, tratando com maior cuidado os aspetos da rigidez, viscosidade e sua quantificação laboratorial. É também apresentada a forma como o betume envelhece e os métodos experimentais que permitem prever esse envelhecimento. Por fim, são estabelecidas as características exigidas a cada um dos tipos de betumes de acordo com a normalização europeia e nacional em vigor.

- ✓ **Capítulo 3 | Fileres para misturas betuminosas**

Neste capítulo são apresentados os tipos de fileres utilizados no fabrico de misturas betuminosas, nomeadamente o processo de fabrico, composição química e

propriedades. Todos os fileres estudados, neste trabalho, são aqui identificados, apresentando-se as diversas origens e propriedades gerais. Do capítulo faz ainda parte a identificação de todas as propriedades relevantes dos fileres, métodos de ensaio associados, apresentação de metodologias de ensaio que, apesar de não previstas na normalização europeia, são importantes para este trabalho na caracterização completa de todos os fileres.

✓ **Capítulo 4 | Mástiques betuminosos**

Depois de analisadas algumas particularidades do conceito de mástique betuminoso, é realizado um profundo estudo sobre o conceito de adesão e coesão, dada a importância que este material desempenha nestes fenómenos, quando envolve e liga a matriz de agregado grosso, constituinte da mistura betuminosa. Neste capítulo são apresentados os ensaios que permitem quantificar a adesividade mástique betuminoso/agregado, com especial aprofundamento para uma metodologia “*pull-off*” desenvolvida neste trabalho.

✓ **Capítulo 5 | Misturas betuminosas**

Neste capítulo são apresentadas as diferentes misturas betuminosas existentes, analisado o comportamento mecânico e estudando os ensaios que permitem prever o seu comportamento na camada, nomeadamente no que diz respeito ao desempenho da mistura em presença da água, rigidez, fadiga e resistência à formação de rodeiras. São apresentados os métodos laboratoriais capazes de estabelecer estes comportamentos, com especial cuidado para as metodologias utilizadas no estudo. Estabelecem-se as características exigidas a cada um dos tipos de misturas betuminosas, de acordo com a normalização europeia e nacional em vigor.

✓ **Capítulo 6 | Resultados e discussão**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados sobre os materiais selecionados para o estudo e é dividido em três grandes subcapítulos:

6.1. Fileres. Neste subcapítulo, para além da apresentação de todo o trabalho experimental realizado para os fileres, são apresentados os valores típicos obtidos nos ensaios realizados, para cada uma das propriedades avaliadas. É ainda realizada a análise aos valores observados para cada uma das propriedades, procurando o estabelecimento de correlações entre as propriedades e estabelecidos comentários acerca da importância de cada propriedade, como característica definidora do comportamento do filer.

6.2. Betumes e mástiques betuminosos. Foi dada particular atenção ao estudo laboratorial do mástique betuminoso, procurando estabelecer o comportamento reológico do material resultante da mistura do filer com o betume. Entendeu-se, por um lado, que o comportamento da mistura betuminosa é decisivamente condicionado pelo desempenho do mástique, e por outro, que este assunto não está suficientemente estudado. Estes motivos conduziram a que o grande investimento na realização de ensaios laboratoriais, se concentrasse no material mástique betuminoso. Sentiu-se no entanto alguma dificuldade na realização dos ensaios para este material, uma vez que não existem documentos normativos para a realização de ensaios. Optou-se assim por utilizar as metodologias estabelecidas para os betumes, adaptando-as, sempre que considerado necessário, para atender à especificidade do material a ensaiar. Neste subcapítulo é realizada uma análise exaustiva aos valores obtidos nos ensaios laboratoriais realizados, estabelecendo comportamentos associados a cada tipo de filer, sua concentração no mástique e tipo de betume utilizado. No final, são apresentadas conclusões sobre a adequabilidade dos métodos utilizados, tendo em conta a realidade portuguesa em termos de betumes e fileres usualmente utilizados, indicando a robustez das metodologias utilizadas.

6.3. Agregados e misturas betuminosas. Com base nos resultados obtidos experimentalmente são estabelecidas conclusões sobre o desempenho observado nas misturas betuminosas, considerando os diferentes constituintes utilizados, procurando, sempre que possível, correlacionar o desempenho obtido com os resultados observados nos fileres e mástiques betuminosos, visando o estabelecimento de comportamentos equivalentes.

✓ **Capítulo 7 | Conclusões**

Neste capítulo são referidas as conclusões mais relevantes do trabalho desenvolvido, perspetivando linhas futuras de investigação a desenvolver, que possam esclarecer algumas questões que ficaram sem resposta por terem surgido no desenrolar do programa, ou melhorar, complementando, alguns aspetos não analisados, ou cuja análise se demonstrou insuficiente.

2

BETUMES PARA MISTURAS BETUMINOSAS

2.1. Introdução

Os betumes são hidrocarbonetos obtidos da destilação do crude do petróleo, devendo-se a sua utilização em pavimentos rodoviários, às suas propriedades particulares que conferem às misturas betuminosas coesão e trabalhabilidade durante o processo de fabrico e aplicação e um comportamento flexível à camada e consequentemente a todo o pavimento.

A figura 2.1 permite observar que, nas refinarias, o crude é inicialmente destilado à pressão atmosférica, sendo o resíduo resultante novamente destilado, agora em vácuo e para temperaturas mais elevadas, sendo adicionados, ao resíduo assim obtido, outros produtos provenientes da destilação do crude, resultando da mistura o betume, produto este utilizado como ligante nas misturas betuminosas.

A utilização de betumes em pavimentos deve-se não só às propriedades apresentadas, mas também à sua insolubilidade na água, capacidade de envolver os agregados, ligan-

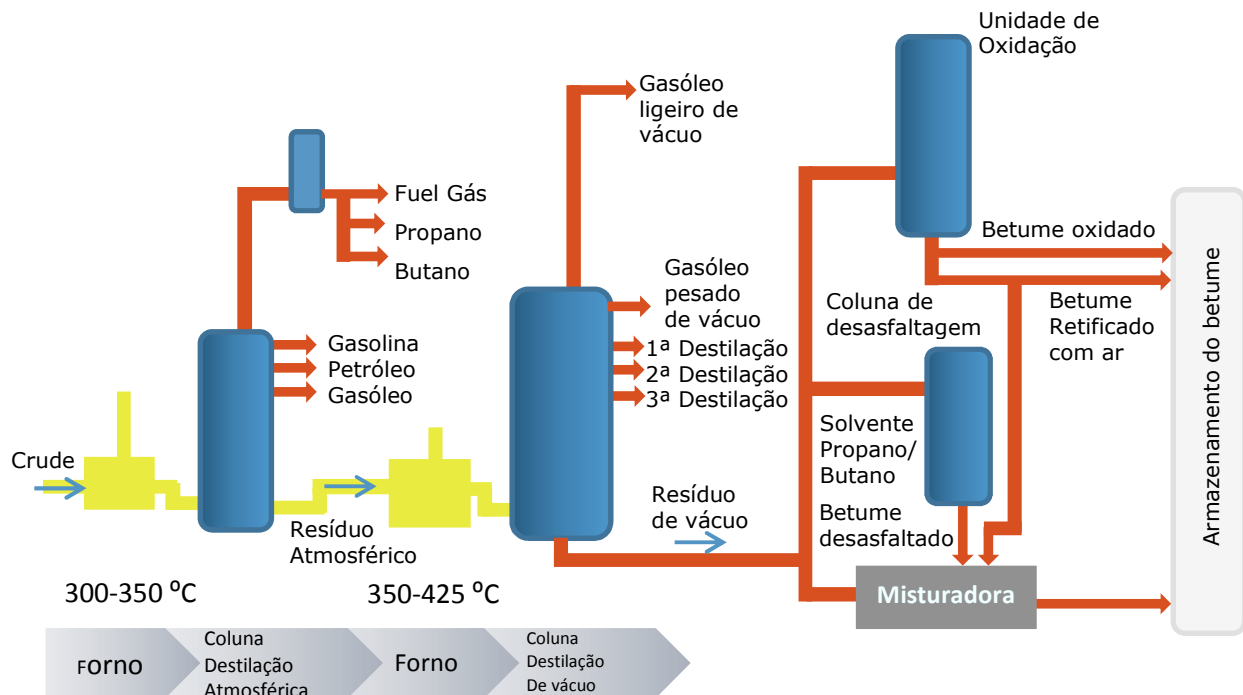


Figura 2.1 Principais processos industriais na destilação do crude para a obtenção do betume, adaptado de: www.eurobitume.eu/bitumen/production-process

-do-os e protegendo-os dos agentes agressivos externos, garantindo uma adequada durabilidade face às ações a que o pavimento vai estar sujeito.

Atualmente, a norma europeia EN 12597 (CEN, 2014), sobre a terminologia que deve ser utilizada na abordagem dos betumes e dos ligantes betuminosos, define betume como sendo um material praticamente não volátil, adesivo, impermeável à água, derivado do petróleo bruto ou presente no asfalto natural, que é completamente ou quase completamente solúvel em tolueno, muito viscoso ou quase sólido à temperatura ambiente.

Os elementos químicos que compõem um betume são: carbono (82-88%), hidrogénio (8-11%), enxofre (0-6%), oxigénio (0-1,5%) e nitrogénio (0-1%) (Read & Whiteoak, 2003). As percentagens exatas de cada um dos elementos químicos variam conforme a origem do crude e o processo industrial associado à obtenção do betume (Silva, 2005).

Os betumes em termos moleculares são constituídos por maltenos e asfaltenos, estes últimos insolúveis em heptano, devendo ser considerados como sistemas coloidais de micelas de elevado peso molecular, os asfaltenos, dispersas num meio dispersante, óleos de menor peso molecular, os maltenos (Branco *et al.*, 2006). Por outro lado, os betumes devem ser entendidos como hidrocarbonetos compostos essencialmente por cinco grupos de componente: asfaltenos, bases nitrogenadas (polares), resinas

aromáticas, naftenos aromáticos e saturados. Cada um dos grupos é composto por uma série de compostos químicos e possui um comportamento característico (tabela 2.1).

Tabela 2.1 Grupos componentes do betume

Fração	Descrição	Reatividade	Função	Grupo
Asfaltenos (As)	Produtos de condensação. Elevado peso molecular	Baixa	Elemento estrutural	Asfaltenos
Bases azotadas Polares (N)	Componentes azotados dos maltenos	Elevada	Peptizante	Maltenos
Resinas aromáticas (A1)	Hidrocarbonetos ou resinas aromáticas	Elevada	Solvente	Maltenos
Naftenos aromáticos (A2)	Hidrocarbonetos azotados aromáticos	Baixa	Solvente	Maltenos
Saturados (P)	Hidrocarbonetos saturados ou parafinas	Baixa	Gelificante	Maltenos

Os asfaltenos encontram-se no betume em muito menor número que os maltenos, entre 5 e 25%, caracterizando-se por possuírem elevado peso molecular e elevada polaridade e a sua concentração influencia de forma decisiva o comportamento geral do betume.

No que concerne aos maltenos, estes distinguem-se dos asfaltenos por se tratarem de hidrocarbonetos solúveis em heptano, podendo ser divididos em saturados, aromáticos e resinas.

Os hidrocarbonetos saturados representam cerca de 5 a 20% do betume, enquanto os hidrocarbonetos aromáticos, constituinte do betume de menor peso molecular, apresentam a maior fração no betume, entre 40 a 60%. Ambos os hidrocarbonetos são não polares e apresentam baixo peso molecular.

Segundo Isacsson & Zeng, 1997, a estrutura química de um betume influencia de forma significativa o comportamento da mistura betuminosa, para toda a gama de temperaturas em serviço.

As resinas, que representam os agentes dispersores dos asfaltenos, possuem elevado peso molecular e apresentam-se muito polarizadas, tornando-se pois muito adesivas.

O conjunto dos hidrocarbonetos saturados e as resinas representam cerca de 50% do betume e as suas percentagens relativas pouco variam. Já para o conjunto dos

asfaltenos e dos aromáticos que representam igualmente cerca de 50% do betume, as suas proporções relativas variam de forma significativa. As percentagens relativas médias em que cada um destes tipos de hidrocarbonetos se apresenta no betume, podem mais facilmente serem entendidas no gráfico da figura 2.2.

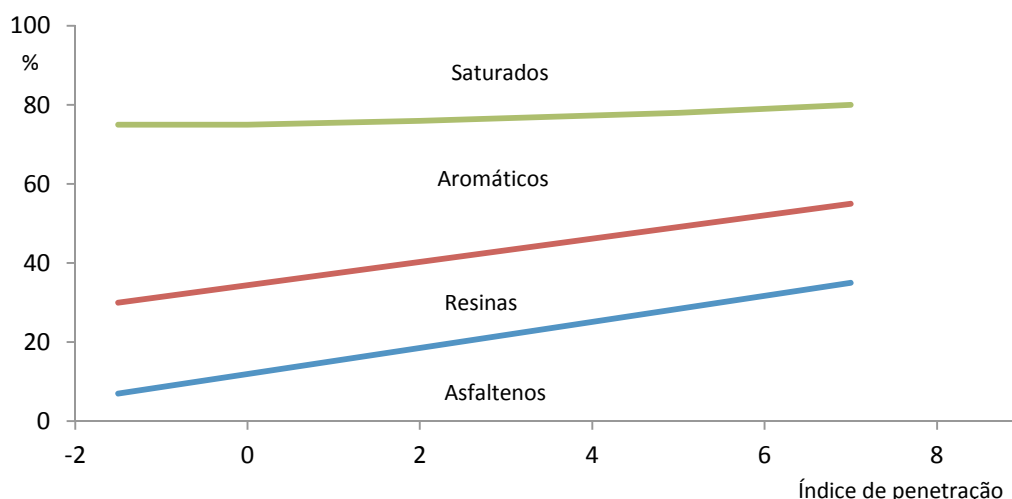


Figura 2.2 Proporções relativas dos hidrocarbonetos presentes num betume, função do seu índice de penetração, adaptado de Read & Whiteoak, 2003

As proporções de cada um destes componentes é hoje conhecida pelas frações “SARA”, conjunto de iniciais das designações em inglês: “*Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes*” (Sá da Costa, 2012).

A estrutura de um betume é tradicionalmente considerada como um sistema coloidal, constituindo por uma dispersão de micelas de asfaltenos revestidas por resinas de elevado peso molecular, num meio dispersante, mais ou menos oleoso, constituído pelos maltenos, aromáticos e saturados de menor peso molecular. Os maltenos constituem-se, assim, como o meio contínuo das micelas de asfaltenos (Branco *et al.*, 2006).

Numa mistura betuminosa, os asfaltenos envolvidos pelas resinas, acabam por se fixar mais junto da superfície do agregado, ficando os maltenos, nomeadamente a fração mais aromática, mais afastados e, portanto, mais perto da periferia da película de betume. Como estes últimos hidrocarbonetos são mais voláteis, o processo de envelhecimento do betume fica mais facilitado com a perda dos hidrocarbonetos mais voláteis e observando-se, assim, o endurecimento e fragilidade do betume residual, devido a uma maior concentração dos asfaltenos de elevado peso molecular.

Quando a concentração das micelas de asfaltenos é baixa, fica garantida a sua perfeita mobilidade e liberdade, não havendo pois a tendência para se agruparem. Neste caso, os betumes são designados do tipo “SOL” (figura 2.3). Se por outro lado a fração de aromático e resinas não se apresenta em quantidade suficiente ou apresenta baixo poder de solubilização, os asfaltenos conseguem-se agrupar, formando entre esses agrupamentos misturas não características. Neste caso, os betumes têm um comportamento do tipo “GEL” (figura 2.4).

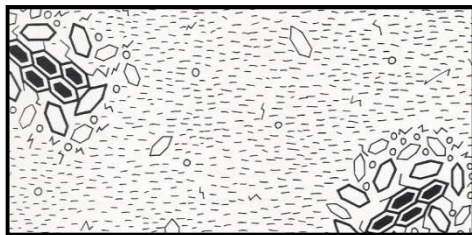


Figura 2.3 Estrutura “SOL” de um betume, adaptado de Read & Whiteoak, 2003

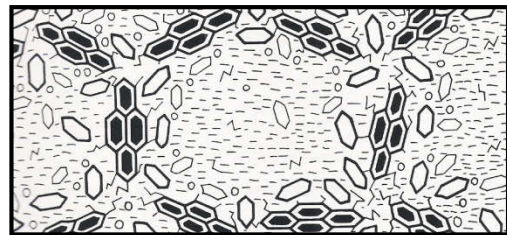


Figura 2.4 Estrutura “GEL” de um betume, adaptado de Read & Whiteoak, 2003

Os betumes utilizados em pavimentação apresentam geralmente um comportamento intermédio entre o “SOL” e o “GEL”, verificando-se uma diminuição do comportamento “GEL” para elevadas temperaturas do betume.

A forma dos asfaltenos e a sua concentração em relação aos aromáticos são responsáveis por alterações importantes do comportamento reológico do betume, nomeadamente a sua viscosidade, bem como do seu comportamento físico, em termos do seu desempenho viscoelástico.

A avaliação da composição química de um betume é uma matéria de elevada complexidade, pelo que a sua caracterização é geralmente realizada através do seu comportamento físico/mecânico, quase sempre por métodos de ensaio empíricos, ou através do seu comportamento reológico por métodos fundamentais.

Um dos aspetos que tem preocupado algumas entidades com responsabilidades em especificar os requisitos para os betumes a utilizar em pavimentação rodoviária, tal como o IP, S. A., Infraestruturas de Portugal, é a existência de ceras parafínicas nos betumes. As parafinas naturais, presentes no crude, e que podem também estar presentes no betume, são misturas complexas de componentes que cristalizam, à medida que a temperatura baixa, e podem ser divididas em três categorias: macrocristalinas, microcristalinas e amorfas.

O tipo e conteúdo de parafinas num betume dependem não só da origem do crude, mas também do processo industrial utilizado na obtenção do betume, pelo que, mesmo crudes de elevado teor em parafinas, não devem à partida ser excluídos para a obtenção de betume. Na realidade, na seleção do crude para a obtenção de betumes é geralmente tido em conta como parâmetro fundamental, a percentagem do resíduo pesado proveniente da destilação.

Apesar da complexidade química das parafinas naturais presentes no betume, admite-se que o seu efeito está associado a duas das suas principais propriedades: estado de cristalização e temperatura de fusão.

A opinião sobre o efeito da presença de parafinas naturais no betume tem variado ao longo do tempo, verificando-se nem sempre ser uma matéria consensual (Edwards, 2011). Efetivamente, elevados teores em parafinas eram considerados prejudiciais para o desempenho final da mistura betuminosa colocada na camada, estando associados a menores desempenhos dos betumes a muito baixas temperaturas (Lu *et al.*, 2008).

A presença de parafinas no betume geralmente reflete-se em dois aspetos:

- ✓ aumento da rigidez a baixas temperaturas e consequentemente um agravamento do risco de rotura frágil do betume para baixas temperaturas em serviço;
- ✓ diminuição da viscosidade a elevadas temperaturas, superiores a 80 °C, característica que tem como consequência a obtenção, a temperaturas mais baixas, da viscosidade necessária para o processo de fabrico da mistura betuminosa e sua compactação.

Este último aspeto é aliás o motivo pelo qual as parafinas, especificamente fabricadas, são atualmente utilizadas como aditivos dos betumes, para a produção de misturas betuminosas temperadas. Nestas aplicações, devem ser realizados estudos laboratoriais para avaliar se a utilização deste agente modificador, poderá ter consequências negativas no desempenho da mistura betuminosa, nomeadamente no que diz respeito a uma maior suscetibilidade a baixas temperaturas.

Devido à importância até agora dada ao teor em parafinas no desempenho dos betumes, alguns autores chegaram mesmo a recomendar a fixação de um limite máximo para esta característica de apenas 0,5% (Srivastara & Rooijen, 2000).

Nordgren & Olsson 2012 concluíram, através da realização de ensaios de corte dinâmico DSR, “*Dynamic Shear Rheometer*”, e ensaios de flexão em viga BBR, “*Bending Beam Rheometer*”, para diferentes origens de betume com o mesmo intervalo

de penetração, que o comportamento a baixas temperaturas em serviço é fortemente influenciado pelo teor em parafinas dos betumes. Os mesmos autores concluíram, também, para valores obtidos em ensaios de pista com “*Wheel tracking*” e ensaios “*Lottman*” modificado, que o desempenho dos betumes não varia com o respetivo teor em parafinas no que diz respeito à formação de rodeiras e adesão ao agregado, ou seja, o comportamento mecânico, a elevadas temperaturas em serviço, não parece ser afetado, perante um maior ou menor teor em parafina do betume. No entanto, o estudo conclui igualmente, que o efeito da parafina no desempenho do betume depende de múltiplos fatores, não só o seu teor, mas também a composição química do betume e a natureza da parafina.

Atualmente, ainda não é consensual uma opinião única sobre os efeitos da presença de parafinas naturais nos betumes, não existindo ainda muitos estudos que procurem correlacionar os efeitos das parafinas no betume, com as características das misturas betuminosas e muito menos, com o desempenho final da camada do pavimento. Na realidade, pensa-se que a influência das parafinas no betume não depende exclusivamente do seu teor, mas também do estado de cristalização e mais principalmente da composição química da parafina. A forma como as componentes microcristalinas das parafinas cristalizam, quando se verifica o abaixamento de temperatura, varia sempre que se verifica o arrefecimento após o aquecimento do betume.

O aspeto mais problemático parece ser a existência no betume de parafinas macrocristalinas. No entanto, este não é um problema nos betumes de pavimentação atualmente utilizados, pois nestes produtos apenas se verifica a existência de parafinas microcristalinas e amorfas.

Assim, para além da quantificação do teor em parafinas e, mais importante ainda que o conhecimento deste valor, torna-se necessário conhecer a sua composição química e cristalina. Na realidade, vários autores (Lu & Redelius, 2006; Edwards *et al.*, 2006) observaram, através de ensaios, que betumes com o mesmo teor em parafinas mas de diferentes origens, deram origem a misturas betuminosas com comportamentos distintos, mesmo no que diz respeito à sensibilidade ao fendilhamento a baixas temperaturas.

Ensaio de calorimetria diferencial de varrimento DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) (figura 2.5), técnica normalmente utilizada para avaliação das propriedades termodinâmicas de materiais, permitiram a Lu *et al.*, 2004 determinar o teor em

parafinas, temperatura início de cristalização e temperatura de fusão. Os resultados obtidos permitiram concluir que betumes com teores em parafina idênticos, mas de diferentes origens, possuem propriedades termodinâmicas muito diferentes, o que vem contrariar pelo menos parte das conclusões estabelecidas por Nordgren & Olsson 2012.



Figura 2.5 Equipamento de calorimetria diferencial de varrimento
www.lmsscscientific.com/products.php?prod_name=thermal-analysis

Existem vários métodos para a quantificação do teor em parafinas de um betume e todos eles dão valores diferentes (Edwards & Redelius, 2003). Esta é aliás uma das razões pela qual existem diversas opiniões sobre o efeito da parafina nas propriedades do betume. Em termos de normalização europeia, existem dois documentos normativos para a quantificação laboratorial do teor em parafinas num betume: uma metodologia por destilação descrita na norma EN 12606-1 (CEN, 2015) e um método por extração normalizado na norma EN 12606-2 (CEN, 1999). Os resultados obtidos por estes dois métodos diferem significativamente, pelo que a edição de 1999, entretanto substituída, da norma EN 12591 definia requisitos distintos para cada um deles: percentagens em massa inferiores a 2,2% e 4,5% respetivamente para o método de destilação e extração. No entanto, a edição de 2009 da norma europeia EN 12591 (CEN, 2009), que define as características a quantificar e os valores limites a observar pelos betumes de pavimentação, não faz qualquer referência à necessidade da quantificação do teor em parafinas no betume, prova de que esta característica não é fundamental para a avaliação do desempenho do betume. Esta decisão deve ser entendida, também, como um primeiro passo para uma maior reestruturação da norma, que se verificará num futuro próximo, passando a caracterização do betume a ser realizada por metodologias fundamentais e abandonando as metodologias empíricas atualmente em vigor, que passarão a ser utilizadas, apenas, como metodologias para o controlo sistemático da matéria prima em obra. Alguns países, como por exemplo os Estados Unidos da

América, já adotaram metodologias fundamentais, procurando assim estabelecer o estudo da reologia do betume para a caracterização dos betumes.

2.2. Reologia

O termo reologia, introduzido inicialmente por Eugene Cook Bingham, encontra-se atualmente definido no meio científico e aceite pela Society of Rheology desde 1929, como sendo o estudo da deformação e escoamento da matéria (Tanner & Walters, 1998). Assim, a reologia deve ser entendida como a ciência que estuda o desempenho mecânico dos materiais, cujo comportamento se situa entre o puramente elástico, que segue a lei de Hooke respeitante à proporcionalidade entre as tensões e as extensões e o comportamento dos fluidos Newtonianos, correspondente ao desempenho dos fluidos que apresentam proporcionalidade entre a tensão e a respetiva taxa de corte.

De facto, a separação destes conceitos não é assim tão simples. Num sólido, quando aplicada uma ação externa, verifica-se um estado de tensão interno, reponsável por uma deformação que estabiliza ao fim de um determinado tempo, quando é atingido o equilíbrio entre o estado de tensão interno e a ação aplicada. No caso dos fluidos, quando submetidos a uma ação, por mais pequena que seja, irá observar-se um movimento contínuo ao longo do tempo, enquanto se mantiver essa ação. Quer isto então dizer que o critério de equilíbrio das forças internas é a estabilização da deformação, no caso dos sólidos, e a estabilização da taxa da deformação, no caso dos líquidos (Barros, 2012).

As propriedades definidoras do comportamento dos materiais são a viscosidade, no caso dos fluidos, e a rigidez no caso dos sólidos. Dado que o betume apresenta os dois comportamentos, de um sólido para temperaturas baixas e de um fluido para elevadas temperaturas, será apresentado neste capítulo o estudo destas duas propriedades: a viscosidade no ponto 2.2.1 e a rigidez no ponto 2.2.2.

Qualquer material flui, dependendo do tempo de observação. Com base neste conceito Marcus Reiner definiu o número de Deborah, valor adimensional, que relaciona o tempo de relaxação do material com o tempo de observação e é dado pela expressão [2.1].

$$D_e = \frac{\lambda}{t_e} \quad [2.1]$$

Em que:

D_e - Número de Deborah;

λ - Tempo característico do material ou tempo de relaxação;

t_e - Tempo característico da observação.

Para um determinado material, se o valor de D_e observado é muito inferior a 1, então o material apresenta um comportamento de um líquido viscoso. No entanto, se o valor D_e característico desse material é muito superior a 1, então o material possui comportamento de sólido elástico. Já o comportamento viscoelástico de um material está associado a valores de número de Deborah próximos da unidade.

O comportamento elástico de um sólido Hookeano pode ser definido pela lei de Hooke, sendo a constante de proporcionalidade dada pelo quociente entre a tensão normal instalada, de compressão ou tração e, a extensão normal correspondente, igualmente de compressão ou de tração. Esta constante dada pela expressão [2.2] tem o nome de módulo de elasticidade ou de Young (E) e representa um valor característico de um dado material elástico.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [2.2]$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade (Pa);

σ – Tensão normal (Pa);

ε – Extensão normal (adimensional).

A proporcionalidade de um material sólido elástico também se aplica no caso de nele se instalar uma tensão de corte, observando-se uma extensão de corte proporcional à tensão de corte instalada. A constante de proporcionalidade é designada por módulo de corte ou de distorção (G) e é calculada através da expressão [2.3].

$$G = \frac{\tau}{\delta} \quad [2.3]$$

Onde:

G – Módulo de corte (Pa);

τ – Tensão de corte (Pa);

δ – Extensão de corte (adimensional).

O betume tem um comportamento variável, correspondente a um sólido elástico a baixas temperaturas e pequenos períodos de carregamento e um líquido viscoso a elevadas temperaturas e elevados períodos de carregamento. Para temperaturas e tempos de carregamento intermédios, o betume apresenta um comportamento viscoelástico.

Como o comportamento viscoelástico se situa numa posição intermédia entre dois comportamentos lineares, o de Hooke e o de Newton, seria de esperar também um comportamento linear para os materiais viscoelásticos. Contudo, para o caso dos betumes, o comportamento viscoelástico para determinadas condições está longe de ser linear, verificando-se uma variação não linear da rigidez com a frequência da aplicação de carga.

Dada a dificuldade em estudar materiais de resposta não linear, procura-se, laboratorialmente, a quantificação das propriedades do betume para condições de ensaio que se enquadrem na gama correspondente ao comportamento viscoelástico linear das amostras, comportamento esse que se observa para baixas temperaturas, pequenos valores da tensão de corte e baixos valores da tensão de carregamento.

A viscosidade é a propriedade mais importante dos betumes, dado que a sua quantificação para diferentes temperaturas permite não só, o conhecimento da reologia do betume, mas também obter informações sobre as temperaturas a adotar em todas as fases de fabrico e compactação das misturas betuminosas, bem como prever o comportamento em serviço da mistura betuminosa aplicada na camada do pavimento.

Os betumes de pavimentação apresentam, usualmente, um comportamento Newtoniano, enquanto que os betumes modificados com polímeros, betumes borracha e alguns mástiques betuminosos, apresentam comportamento não Newtoniano, do tipo fluidificante, ou seja, apresentam um valor de viscosidade tanto menor quanto maior a taxa de corte.

2.2.1. Viscosidade

A viscosidade de um fluido pode ser definida como a resistência ao movimento, sem turbulência, por parte do fluido e está relacionada com as propriedades dinâmicas desse mesmo fluido.

A viscosidade geralmente divide-se em dois tipos: viscosidade dinâmica, não influenciada pela ação da gravidade, e viscosidade cinemática, característica dependente da ação da gravidade. A viscosidade dinâmica deve ser expressa em Pascal segundo (Pa.s), por utilização do Sistema Internacional de Unidades (SI), sendo, no entanto usual a apresentação em Poise (P), unidade do sistema CGS (Centímetro-Grama-Segundo), sendo que 1 Pa.s é igual a 10 P e igual a 1000 cP, podendo pois afirmar-se que 1 mPa.s pode ser expresso como 1 cP.

Por outro lado, a viscosidade cinemática expressa-se em metros quadrados por segundo e as duas características, a viscosidade dinâmica e a viscosidade cinemática podem ser relacionadas através da expressão [2.4].

$$\eta_c = \frac{\eta}{\rho} \quad [2.4]$$

em que:

η – Viscosidade dinâmica (Pa.s);

η_c – Viscosidade cinemática ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

ρ – Massa volúmica do fluido ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$).

A viscosidade dinâmica pode ser explicada fisicamente, pela aplicação de uma força a um de dois planos paralelos, com a área de A , distanciados de d_x , força essa capaz de deslocar o fluido contido entre esses dois planos, a uma velocidade d_v (figura 2.6). A sua quantificação é dada pelo cociente entre a tensão de corte aplicada ao fluido e a respetiva taxa de corte [2.5], em que a tensão de corte se obtém pela relação entre a força aplicada e a secção de carregamento [2.6] e a taxa de corte é obtida pela relação entre a velocidade e a distância entre os planos [2.7].

Já a viscosidade cinemática é, geralmente, avaliada pelo tempo de escoamento vertical do fluido, através de um orifício ou de uma coluna.

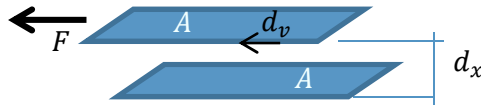


Figura 2.6 Esquema do escoamento de um fluido, adaptado de Barnes *et al.*, 1989

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad [2.5]$$

em que:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [2.6]$$

e

$$\gamma = \frac{d_v}{d_x} \quad [2.7]$$

com:

η – Viscosidade dinâmica (Pa.s)

τ - Tensão de corte (Pa) F – Força de corte (N)

d_v – Velocidade de corte (m.s⁻¹)

γ - Taxa de corte (s⁻¹) A – Área do plano de corte (m²)

d_x – Afastamento entre planos de corte (m)

De acordo com o que é usual em termos científicos, sempre que neste trabalho seja referido apenas o termo viscosidade, o mesmo diz respeito à viscosidade dinâmica.

A viscosidade de um fluido é função da pressão, aspeto que para a maior parte das aplicações é desprezável, pois a utilização dos betumes é realizada à pressão atmosférica, da temperatura e do tempo de carregamento. No caso de o fluido possuir um comportamento não Newtoniano, a viscosidade depende também da taxa de corte aplicada.

Para fluidos não Newtonianos do tipo reofluidificantes, ou seja, em que a viscosidade diminui com o aumento da taxa de corte, a lei que define a viscosidade em função da taxa de corte é designada por modelo de Cross e é representada pela equação [2.8].

Nesta equação η_0 e η_∞ representam as assintotas, correspondentes respetivamente à viscosidade a muito baixas e muito altas taxas de corte, valores para os quais o material apresenta comportamento praticamente Newtoniano, ou seja, a viscosidade é

independente do valor da taxa de corte. Essas assíntotas correspondem a zonas do gráfico, em que a função se apresenta praticamente linear e as quais são designadas por primeira e segunda zona Newtonianas. Na expressão os valores k e m são constantes, sendo a primeira expressa em unidades por segundo e a segunda é adimensional.

$$\frac{\eta(\gamma) - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (k\gamma)^m} \quad [2.8]$$

Em que:

$\eta(\gamma)$ – Viscosidade função da taxa de corte (Pa.s);

η_{∞} - Viscosidade a taxa de corte infinita (Pa.s);

η_0 – Viscosidade a taxa de corte zero (Pa.s);

k – Constante (s^{-1});

m – Constante (adimensional).

Esta mesma expressão toma a forma da expressão [2.9], quando falamos de ensaios de corte oscilatórios por aplicação de um carregamento sinusoidal, onde ω representa a velocidade angular do movimento.

$$\frac{\eta^*(\omega) - \eta_{\infty}^*}{\eta_0^* - \eta_{\infty}^*} = \frac{1}{1 + (k\omega)^m} \quad [2.9]$$

Em que:

ω – velocidade angular ($rad.s^{-1}$).

O valor de η_0 é designado por viscosidade à taxa de corte zero e representa a viscosidade observada pelo fluido em repouso, podendo ser quantificada para valores da taxa de corte muito baixos, próximos de zero. O valor da taxa de corte, para a qual se atinge o comportamento Newtoniano do betume, fornece informação sobre a estrutura molecular do betume. Assim, torna-se fundamental o conhecimento da viscosidade à taxa de corte zero e do traçado da curva taxa de corte/viscosidade na

zona de baixos valores de taxa de corte, como forma de prever o comportamento dos betumes, nomeadamente dos betumes modificados.

Para elevadas temperaturas, os betumes de pavimentação apresentam comportamento próximo do Newtoniano sendo por isso regido pela equação [2.4]. Porém, segundo Ven & Jenkins, 2003, os betumes modificados apresentam, para elevadas temperaturas, comportamento não Newtoniano do tipo reofluidificante, cujo comportamento pode ser definido pela expressão [2.8].

A variação da viscosidade com a taxa de corte pode ser obtida experimentalmente, para elevadas temperaturas correspondentes às temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, através de viscosímetros rotativos, ou por reómetros de corte, para elevadas e médias temperaturas em serviço, que devem, no entanto, ser capazes de aplicar uma gama muito alargada de valores de taxa de corte. Experimentalmente, deve haver o maior cuidado no registo dos valores da viscosidade, no que diz respeito ao tempo de estabilização após aplicação da taxa de corte pretendida, pois a resposta do material não é imediata, devendo ser assegurado o tempo necessário para a perfeita estabilização da temperatura e do valor da viscosidade do fluido, para só então ser registado o valor correto da viscosidade.

Para o caso dos betumes é normal a realização de ensaios num viscosímetro rotativo, para diferentes velocidades de rotação, sendo, deste modo, possível traçar a curva que relaciona a viscosidade com a velocidade de rotação da agulha e, assim, obter por extrapolação, a viscosidade a taxa corte zero conforme representado na figura 2.7.

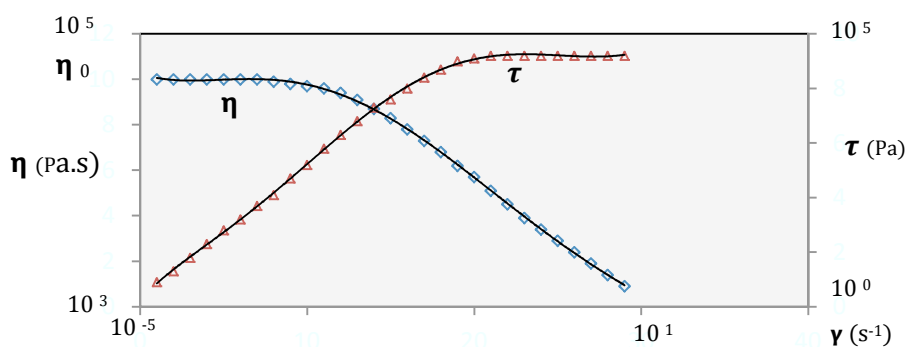


Figura 2.7 Esquema da variação da viscosidade e da tensão de corte com a taxa de corte, adaptado de Lauger & Bernzen, 2000

O valor da viscosidade do betume pode ser também obtido através de ensaios oscilatórios no reômetro de corte dinâmico. A viscosidade, assim obtida, é designada por viscosidade complexa e é calculada de acordo com a expressão [2.10] (Pereira, 2015).

$$|\eta^*| = \frac{|G^*|}{\omega} \quad [2.10]$$

Em que:

η^* - Viscosidade complexa (Pa.s);

G^* - Módulo de corte complexo (Pa.s).

Com o reômetro de corte, é usual realizar ensaios de corte oscilatórios para diferentes taxas de corte, procedimento designado por varrimento de frequências e assim obter uma curva que relaciona o módulo da viscosidade complexa com a frequência angular aplicada, ou seja, com a taxa de corte utilizada, obtendo-se a viscosidade a taxa de corte zero, através da extrapolação dos valores obtidos (figura 2.8).

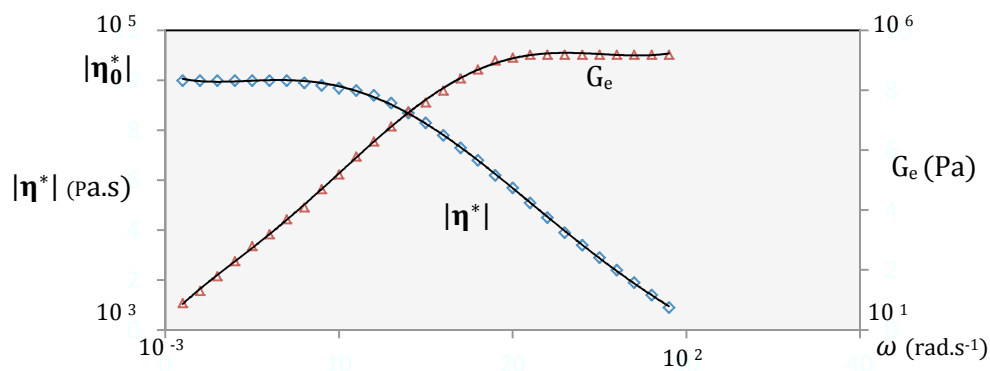


Figura 2.8 Esquema da variação do módulo da viscosidade complexa e da componente real do módulo de corte complexo com a velocidade angular, adaptado de Lauger & Bernzen, 2000

2.2.2. Rigidez

À medida que a temperatura baixa, o betume deixa progressivamente de se comportar como um fluido viscoso, passando a ter um comportamento de um sólido viscoelástico. Para temperaturas baixas e muito baixas em serviço, não é possível definir o comportamento de um betume através da sua viscosidade, passando a fazer-se o estudo do seu desempenho através da rigidez.

A rigidez de um betume depende fundamentalmente de três fatores: temperatura, frequência do carregamento ou tempo de carregamento e forma de carregamento. Ao aplicar um carregamento por flexão do tipo sinusoidal sobre uma amostra de betume, instalam-se, no provete, estados de tensão de tração e compressão dados pela expressão [2.11] em que a frequência angular do carregamento é dada pela expressão [2.12].

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad [2.11]$$

Com:

$$\omega = 2\pi f \quad [2.12]$$

Em que:

σ - Tensão de tração ou compressão em qualquer momento “t” do carregamento (Pa);

σ_0 – Tensão de tração ou compressão máxima aplicada no carregamento (Pa);

ω – Período ou frequência angular (rad.s⁻¹);

t – Tempo (s);

f – Frequência (Hz).

Perante esta ação o provete sofre uma deformação a que corresponde uma extensão de tração ou de compressão dada pela expressão [2.13].

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \emptyset) \quad [2.13]$$

Em que:

ε - Extensão de tração ou de compressão em qualquer momento “t” do carregamento (adimensional);

ε_0 – Extensão de tração ou de compressão máxima verificada durante o carregamento (adimensional);

\emptyset – Ângulo de fase (rad);

ω – Velocidade angular (rad.s⁻¹);

t – tempo (s).

Dado o comportamento viscoelástico do betume, observa-se um atraso nas extensões relativamente ao carregamento, representado na expressão pelo ângulo de fase “ \emptyset ”. O valor do ângulo de fase é tanto maior quanto mais plástico o comportamento do betume e contrariamente, será tanto menor quanto mais elástico for o comportamento do betume. Assim, o ângulo de fase cresce com o aumento da temperatura do betume e com o número de ciclos de aplicação de cargas, neste caso devido à fadiga do material. O módulo de rigidez complexo de um betume E^* é dado pelo cociente da tensão pela extensão pelas expressões [2.14] e [2.15].

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \emptyset + i \sin \emptyset) = |E^*| (\cos \emptyset + i \sin \emptyset) \quad [2.14]$$

$$E^* = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \emptyset)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \emptyset)}} \quad [2.15]$$

A equação [2.14] pode ser ainda decomposta em duas componentes:

- ✓ uma no domínio real “ E_e ”, que corresponde à fase elástica, ou seja, à componente de energia armazenada pelo betume durante o carregamento e que é libertada depois com a descarga, de deformação recuperada [2.16];
- ✓ e uma outra componente imaginária “ E_v ”, correspondente à fase plástica, ou seja, à componente de energia dissipada por atrito interno, de deformação irreversível ou residual [2.17].

$$E_e = |E^*| \cos \emptyset \quad [2.16]$$

$$E_v = |E^*| \sin \emptyset \quad [2.17]$$

As equações 2.18 e 2.19 apresentam respetivamente o valor do módulo de rigidez complexo em módulo e o valor do ângulo de fase.

$$|E^*| = \sqrt{E_e^2 + E_v^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad [2.18]$$

$$\emptyset = \arctan\left(\frac{E_v}{E_e}\right) \quad [2.19]$$

A rigidez de um betume deve ser quantificada através de ensaios laboratoriais, realizados em equipamentos apropriados, como por exemplo, com o reômetro de corte dinâmico, cuja metodologia será descrita no capítulo 4. Na figura 2.9 está esquematizado um carregamento sinusoidal, com aplicação de um valor de tensão constante σ_0 para o qual se verifica uma extensão (ε_0) e um ângulo de fase (\emptyset). Com a repetição dos carregamentos e mantendo em todos eles o mesmo valor de carga (σ_0), verificar-se-ia o aumento gradual dos valores da extensão e do ângulo de fase, devido à fadiga provocada pela repetição do carregamento.

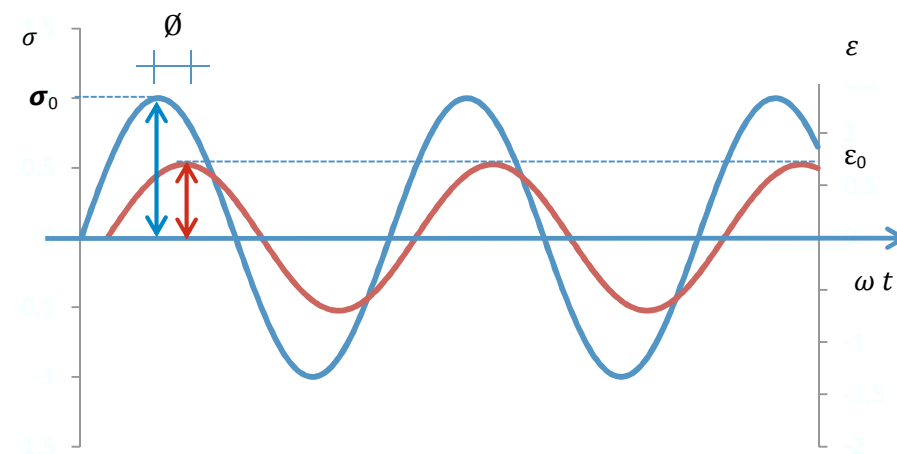


Figura 2.9 Esquema de um carregamento sinusoidal (a azul) e respectivas extensões (a vermelho)

Por outro lado, a energia dissipada em cada ciclo de carga W_c , em Pascal, é dada pela expressão [2.20].

$$W_c = \pi \sigma_0^2 \left(\frac{1}{|E^*| \sin \emptyset} \right) \quad [2.20]$$

Quanto menor a energia dissipada mais elástico será o comportamento do betume. A expressão [2.20] permite-nos concluir que um betume apresenta um comportamento tanto mais elástico quanto maior a expressão $|E^*|/\sin \emptyset$. Este termo é referenciado pelo programa SHRP por Harrigan *et al.*, 1994 como indicador da suscetibilidade de um betume às deformações permanentes.

Todas as expressões apresentadas dizem respeito a um carregamento que provoca, nas secções da amostra, tensões normais e que originam extensões normais a esses planos. No entanto, todas as expressões se mantêm válidas, no caso do carregamento ser por corte, ou seja, provocando tensões e extensões de corte segundo o plano das

secções carregadas, havendo apenas o cuidado de adaptar a nomenclatura respetiva. As expressões passam assim a ter as configurações apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Expressões associadas ao comportamento viscoelástico de um betume

Expressão	Carregamento normal ou axial	Carregamento tangencial ou de corte
2.11	$\sigma = \sigma_0 \sin (\omega t)$	$\tau = \tau_0 \sin (\omega t)$
2.13	$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin (\omega t + \emptyset)$	$\delta = \delta_0 \sin (\omega t + \emptyset)$
2.14	$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \emptyset + i \sin \emptyset) = E^* (\cos \emptyset + i \sin \emptyset)$	$G^* = \frac{\tau_0}{\delta_0} (\cos \emptyset + i \sin \emptyset) = G^* (\cos \emptyset + i \sin \emptyset)$
2.15	$E^* = \frac{\sigma_0 \sin (\omega t)}{\varepsilon_0 \sin (\omega t - \emptyset)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \emptyset)}}$	$G^* = \frac{\tau_0 \sin (\omega t)}{\delta_0 \sin (\omega t - \emptyset)} = \frac{\tau_0 e^{i\omega t}}{\delta_0 e^{i(\omega t - \emptyset)}}$
2.16	$E_e = E^* \cos \emptyset$	$G_e = G^* \cos \emptyset$
2.17	$E_v = E^* \sin \emptyset$	$G_v = G^* \sin \emptyset$
2.18	$ E^* = \sqrt{E_e^2 + E_v^2}$	$ G^* = \sqrt{G_e^2 + G_v^2}$
2.19	$\emptyset = \arctan \left(\frac{E_v}{E_e} \right)$	$\emptyset = \arctan \left(\frac{G_v}{G_e} \right)$
2.20	$W_c = \pi \sigma_0^2 \left(\frac{1}{ E^* / \sin \emptyset} \right)$	$W_c = \pi \tau_0^2 \left(\frac{1}{ G^* / \sin \emptyset} \right)$

2.3. Envelhecimento

O envelhecimento dos betumes é um processo de natureza físico-química, que conduz à alteração da composição química do betume, modificando a sua estrutura coloidal e manifesta-se na prática, por um endurecimento e por uma perda das suas características mecânicas e de adesão. No processo de envelhecimento dos betumes, os produtos mais aromáticos transformam-se em resinas e estas, por sua vez, em asfaltenos mais polares e com aglomerados moleculares de maiores dimensões. Ao perderem as moléculas solventes e envolventes dos asfaltenos, os betumes envelhecidos passam a apresentar um comportamento do tipo “GEL”, com grandes núcleos de asfaltenos, mal dispersos na matriz de maltenos. Assim, a estrutura passa a ser bem diferente do betume original, que apresentava inicialmente um comportamento mais próximo de uma estrutura do tipo “SOL”, formada por aglomerados de asfaltenos

de menor dimensão, com menor polaridade e bem dispersos na matriz dos restantes componentes do betume (Pepe *et al.*, 2009).

O estado de envelhecimento de um betume pode ser avaliado, através dos valores obtidos em ensaios empíricos realizados aos betumes, como os ensaios de penetração, EN 1426 (CEN, 2015), temperatura anel e bola, EN 1427 (CEN, 2015), temperatura de fragilidade Fraass, EN 12593 (CEN, 2015) e viscosidade cinemática, EN 12595 (CEN, 2014), ou através do comportamento reológico avaliado em ensaios com viscosímetro rotativo, EN 13302 (CEN, 2010) e em ensaios com reómetro de corte EN 14770 (CEN, 2012), ou mesmo através do estudo da composição química por cromatografia.

No caso da reciclagem de pavimentos é necessário, frequentemente, não só prever a utilização de betumes novos, de penetração mais elevada para atender ao endurecimento do betume existente na mistura a reciclar, mas também de um rejuvenescedor, com o objetivo de dotar o ligante de características físico-químicas adequadas, nomeadamente no que diz respeito à sua adesão ao agregado.

Na formulação de uma mistura betuminosa com incorporação de misturas betuminosas fresadas, a análise química da mistura do betume velho presente na mistura betuminosa fresada, do betume novo e do rejuvenescedor a incorporar na mistura betuminosa, irá permitir escolher o rejuvenescedor mais adequado, bem como a dosagem deste no ligante.

Para que o betume mantenha a sua estrutura físico-química e assim seja capaz de assegurar um bom comportamento, durante a vida útil do pavimento, é necessário que todos os grupos, apresentados na tabela 2.1, não verifiquem, com o passar do tempo em serviço, grandes variações no que diz respeito às suas proporções relativas.

A dosagem de cada um dos grupos químicos presentes no ligante permite quantificar três índices: índice de reatividade química (CRR), índice de estabilidade coloidal (Ic) e índice de compatibilidade do rejuvenescedor (C) dados pelas expressões 2.21, 2.22 e 2.23, respetivamente.

$$CRR = \frac{N + A1}{P + A2} \quad [2.21]$$

$$Ic = \frac{As + P}{N + A1 + A2} \quad [2.22]$$

$$C = \frac{N}{P} \quad [2.23]$$

Em que:

N – Dosagem das bases nitrogenadas;

A_1 – Dosagem das resinas aromáticas;

P - Dosagem saturados;

A_2 - Dosagem dos naftenos aromáticos;

A_s - Dosagem de asfaltenos.

O índice de reatividade química é um parâmetro de durabilidade que estabelece a relação entre os componentes mais reativos e os menos reativos dos maltenos. Este índice deve ser suficientemente elevado para que possa haver uma adequada dispersão dos asfaltenos, mas não demasiado alto para evitar a dissolução destes componentes, devendo o seu valor situar-se no intervalo entre 0,4 e 1,5.

O índice de instabilidade coloidal relaciona os componentes sólidos presentes no sistema, ou seja, os asfaltenos e as parafinas com os componentes líquidos dispersantes. Este índice apresenta valores inferiores para o caso de betumes de pavimentação.

Valores do índice de compatibilidade do rejuvenescedor inferiores a 0,5 denunciam baixos teores de bases nitrogenadas e um elevado teor de parafinas, elevando assim o risco de ocorrer a exsudação do rejuvenescedor (Dueñas *et al.*, 2009).

Geralmente, num processo de envelhecimento de um betume, observa-se uma perda de hidrocarbonetos aromáticos e um aumento de resinas e asfaltenos, menos acentuado no caso dos asfaltenos, verificando-se ainda que os hidrocarbonetos saturados permanecem mais ou menos constantes. A relação entre estes últimos componentes é muito importante no modelo coloidal dos betumes, pois se o aumento dos asfaltenos for maior que o aumento das resinas, resulta numa maior facilidade em os asfaltenos se condensarem e o envelhecimento do betume será mais acelerado.

O envelhecimento da mistura betuminosa na camada deve-se essencialmente ao envelhecimento do betume, verificando-se uma diminuição do envelhecimento da mistura betuminosa com o aumento da profundidade na camada. No caso de misturas betuminosas densas, a cerca de 10 cm de profundidade, praticamente já não se verifica o envelhecimento da mistura por processos de oxigenação e temperatura.

Contrariamente ao que acontece com os betumes, no caso do envelhecimento das misturas betuminosas, ainda não existe consenso na metodologia a seguir para a simulação laboratorial. Trabalhos realizados por alguns autores (Hachiya *et al.*, 2003) evidenciam que, processos de simulação de envelhecimento através da exposição da mistura betuminosa são adequados se pretendermos estudar a alteração das características mecânicas da mistura betuminosa com o seu envelhecimento. No entanto, a metodologia não é adequada se pretendermos estudar as alterações físicas e químicas, sendo neste caso, aconselhado o envelhecimento laboratorial através da exposição da mistura betuminosa ao oxigénio.

2.4. Caracterização laboratorial

Conforme referido anteriormente o comportamento reológico dos betumes deve ser realizado através do estudo da viscosidade para elevadas temperaturas e da rigidez para baixas temperaturas, pelo que a apresentação da caracterização laboratorial das propriedades dos betumes se fará essencialmente para estas duas características, sendo dado especial atenção aos métodos de ensaio utilizados neste trabalho.

2.4.1. Quantificação da viscosidade

Existem variadíssimos tipos de equipamentos pra quantificar a viscosidade de um fluido, sendo de seguida descritos os equipamentos mais utilizados para o caso dos ligantes betuminosos.

2.4.1.1. Viscosímetros de tubo capilar

Os viscosímetros de tubo capilar são equipamentos, normalmente em vidro, em forma de “U”, utilizados para quantificar a viscosidade de fluidos Newtonianos, viscosidade essa cinemática se realizados à pressão atmosférica (figura 2.10), ou dinâmica, se realizados em vácuo (figura 2.11).

O método de ensaio, associado a estas duas metodologias consiste em fazer passar o fluido, para o qual se pretende conhecer a viscosidade, de um ramo para o outro do viscosímetro, através de um tubo capilar.

O resultado do ensaio é obtido através da quantificação do tempo necessário para que determinado volume do fluido escoe através desse tubo capilar. Este tipo de equipamento está previsto na metodologia europeia para a avaliação da viscosidade

dos betumes de pavimentação e betumes modificados: EN 12595 (CEN, 2014), para a quantificação da viscosidade cinemática e EN 12596 (CEN, 2014) para a avaliação da viscosidade dinâmica.



Figura 2.10 Viscosímetro de tubo capilar para avaliação da viscosidade cinemática
www.khushbooscientific.com/Oil-Petroleum-Bitumen-Concrete-Test-Instruments.htm



Figura 2.11 Viscosímetro de tubo capilar para avaliação da viscosidade dinâmica por vácuo
www.jingkeyiqi.com/html/product/show_product_w1_3364.html

2.4.1.2. Viscosímetros de orifício

A metodologia associada a este tipo de equipamentos baseia-se em provocar a passagem de um determinado volume do fluido, por gravidade, através de um orifício de secção conhecida, medindo o tempo necessário para se realizar o referido escoamento em condições de temperatura controlada.

Os viscosímetros de orifício mais utilizados são: viscosímetro de Saybolt, viscosímetro de Engler, viscosímetro de Redwood e ainda o viscosímetro de Copo Ford (figura 2.12). Os viscosímetros de orifício são previstos nas normas europeias para quantificar a viscosidade cinemática das emulsões e dos betumes fluidificados.

2.4.1.3. Viscosímetros de queda de esfera

A viscosidade cinemática de um fluido pode ainda ser determinada através de um viscosímetro de Stokes ou viscosímetro de queda de esfera (figura 2.13). A metodologia prevê a quantificação do tempo que uma esfera sólida, de massa conhecida, demora a percorrer a distância entre dois pontos marcados num recipiente cheio com o fluido que

se pretende ensaiar. A utilização deste tipo de viscosímetro não está prevista em qualquer norma de ensaio associada a ligantes betuminosos.

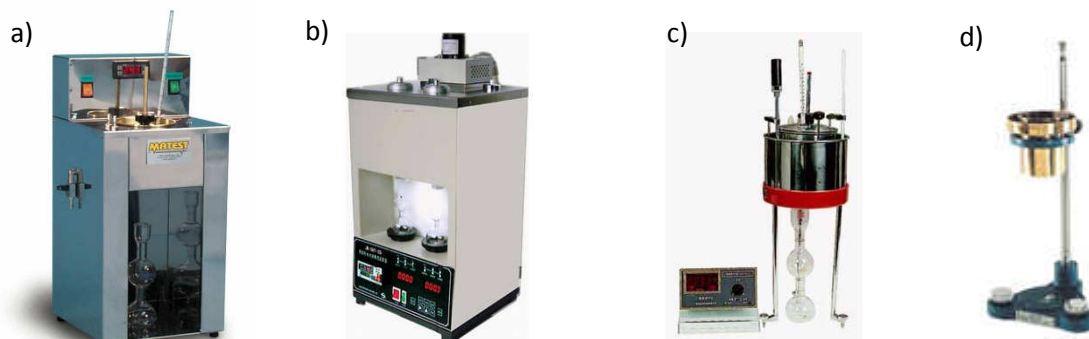


Figura 2.12 Viscosímetros de orifício: **a) Redwood** www.matest.com/en/Products/bitumen-asphalt/VISCOMETERS/engler-viscometers/b080-engler-digital-viscometer-0
b) Saybolt www.aliexpress.com/item/JK-SVT-23-Saybolt-Viscosity-Tester/462385064.html
c) Engler www.lab-kits.com/PT-EV-03 **d) Copo Ford** [http://www.aimil.com/product-Flow_Cup_\(AIM_539\)-1009.aspx](http://www.aimil.com/product-Flow_Cup_(AIM_539)-1009.aspx)



Figura 2.13 Viscosímetro de queda de esfera (en.petrotech.ru/en/equipment/D/1/)

2.4.1.4. Viscosímetros rotativos

Os viscosímetros rotativos permitem avaliar a viscosidade dinâmica de um fluido, através da medição da força de corte necessária realizar para manter o movimento de rotação de um corpo imerso no seu interior a uma taxa de corte constante.

Existem vários tipos de viscosímetros rotativos, sendo as maiores diferenças entre eles relacionadas com a forma e dimensões do corpo imerso no fluido a ensaiar. No entanto, os tipos de equipamentos mais conhecidos são: viscosímetro de Stormer, geralmente utilizado para avaliação da viscosidade à temperatura ambiente e para fluidos de baixa viscosidade; viscosímetro de pratos paralelos; viscosímetros cone-prato; viscosímetros de cilindro concêntrico este muito utilizado na indústria para controlo da qualidade dos

produtos e das matérias-primas e por fim o viscosímetro de Brookfield, em que o corpo imerso no fluido a ensaiar possui a forma de uma agulha cilíndrica (figura 2.14).

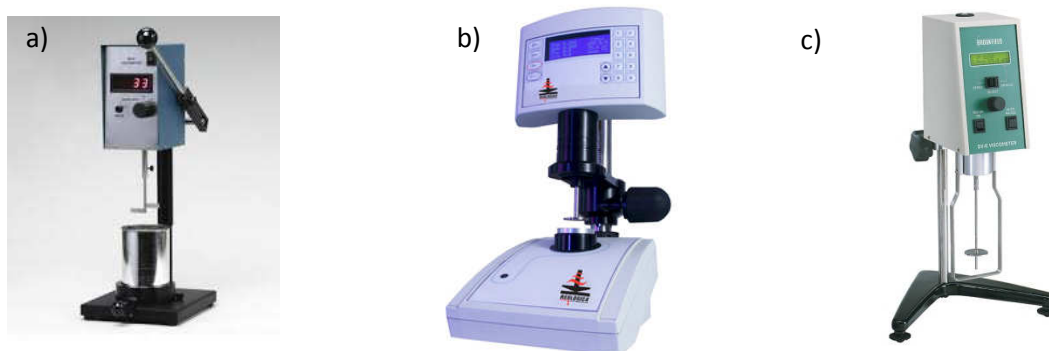


Figura 2.14 Viscosímetros rotativos:

- a) **Stormer** www.getdomainvids.com/keyword/stormer%20viscometer/
- b) **De pratos paralelos** www.labwrench.com/?equipment.view/equipmentNo/9018/ATS-RheoSystems/MERLIN-Viscometer/
- c) **Brookfield** www.coleparmer.com/Product/Brookfield_Low_range_viscometer_115_VAC/EW-98945-00

A metodologia de quantificação da viscosidade dinâmica através do viscosímetro rotativo é descrita na norma EN 13302 (CEN, 2010) e aplica-se a qualquer tipo de ligante betuminoso utilizado em pavimentação: betumes de pavimentação, betumes modificados, emulsões e betumes fluidificados.

Este viscosímetro rotacional é muito utilizado por ser de simples manuseamento, com um procedimento de ensaio associado em que a interferência do operador é praticamente nula, baixos custos de execução dos ensaios, permitindo igualmente a quantificação de uma gama alargada de viscosidades. Mais uma vantagem deste ensaio é que uma única amostra permite realizar uma grande série de medições, para diferentes temperaturas e/ou diferentes taxas de corte reduzindo o risco da dispersão de resultados resultantes da preparação de novos provetes ou de períodos de estabilização de temperaturas distintos.

O viscosímetro Brookfield funciona por rotação, medindo a força de torque (binário) necessária para fazer rodar uma agulha que se encontra submersa no fluido para o qual se pretende determinar a viscosidade. A agulha move-se a uma velocidade constante, conhecida e pré-definida e a força de torque é medida em percentagem de esforço que uma mola calibrada necessita de fazer para que a agulha se mova a essa mesma velocidade (Santos, 2011).

O viscosímetro possui diferentes agulhas (figura 2.15) a que correspondem vários diâmetros, sendo que cada uma tem uma gama de aplicação específica. As agulhas de menor diâmetro são utilizadas em fluidos de maior viscosidade ou para temperaturas mais baixas, enquanto as agulhas de maiores diâmetros são selecionadas para ensaios de fluidos com menor viscosidade ou para temperaturas mais elevadas (Miranda, 2014).

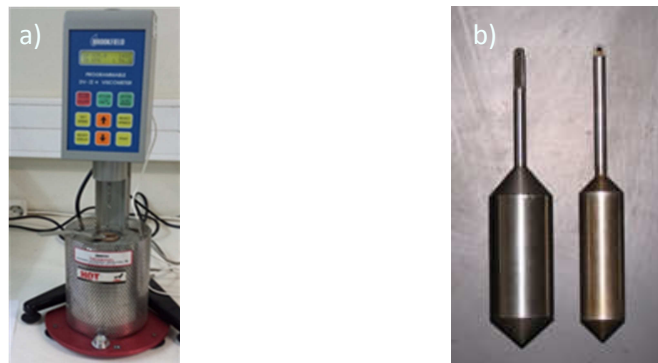


Figura 2.15 a) Viscosímetro rotativo b) agulhas utilizadas nos ensaios de viscosidade

As propriedades de um betume, obtidas através de ensaios empíricos como a penetração e a temperatura anel e bola, não caracterizam o comportamento de um betume. Dada a complexidade reológica de um betume, nomeadamente dos betumes modificados, também o conhecimento da viscosidade, quantificada através do viscosímetro rotativo não é suficiente para o total conhecimento do comportamento de um betume. Assim, tem-se assistido ultimamente, ao forte empenho de algumas entidades, como por exemplo o CEN, *European Committee for Standardization*, nomeadamente o “*Technical Committee, CEN/TC 336 - Bituminous Binders*”, para o estudo que conduza à adoção de metodologias mais racionais para a análise do comportamento dos betumes, como sejam, a adoção de ensaios com reómetro de corte. As metodologias de ensaio possuem já normalização europeia, prevendo-se que a muito breve prazo se venha a assistir à adoção destes métodos racionais nas normas de produto europeias, visando o estudo e caracterização dos betumes através da quantificação dos parâmetros reológicos, reservando-se os ensaios empíricos para um controlo mais sistemático na receção dos produtos e no controlo em obra.

2.4.2. Quantificação da rigidez com reómetro de corte dinâmico

Como já fora referido em capítulos anteriores, a reologia é a ciência que estuda o movimento dos materiais, analisando as deformações resultantes da aplicação de ações externas ao material.

Apesar de o betume representar apenas uma pequena parte de uma mistura betuminosa, o seu comportamento reológico influencia a maior parte das características mecânicas e reológicas da mistura betuminosa, sendo responsável pela resposta complexa da mistura betuminosa face às ações mecânicas e térmicas a que ela é sujeita no pavimento.

A caracterização empírica dos betumes através de ensaios como a penetração, temperatura anel e bola e indicadores de comportamento como o índice de penetração, que caracteriza a suscetibilidade térmica dos betumes, não são capazes por si só de caracterizar convenientemente o betume, dado o comportamento viscoelástico deste material.

Os ensaios de avaliação da viscosidade, através de viscosímetros rotativos, são ensaios fundamentais para a avaliação do comportamento do betume a diferentes temperaturas, mas não permitem estudar o comportamento do betume a baixas e médias temperaturas ambiente, conhecer as alterações de comportamento com o envelhecimento nem quantificar as relações entre as componentes elásticas e viscosas dos ligantes.

A consideração do comportamento viscoelástico para os betumes foi primeiramente descrito por Van der Poel, em 1954, que, através de ensaios dinâmicos e de corte estático realizados a diferentes temperaturas, permitiu estabelecer nomogramas com os quais é possível definir o módulo de um betume, através de ensaios empíricos como a penetração e a temperatura anel e bola.

O reómetro de corte dinâmico permite obter para qualquer tipo de betume e para as temperaturas de serviço dos betumes, os valores do módulo de rigidez complexo, o ângulo de fase e a viscosidade complexa.

Entende-se por viscosidade complexa o valor da viscosidade obtido da conjugação das duas componentes do movimento imposto ao fluido: a componente elástica, real, recuperável e a componente plástica, imaginária e irrecuperável.

O provete é constituído por um anel de betume, de forma circular, podendo ser obtido por corte de uma amostra preparada através do enchimento de uma secção que define a espessura do provete de betume pretendida (figura 2.16).

O diâmetro do provete é igual ao dos pratos de ensaio e os valores da sua espessura dependem da gama de leituras a efetuar e são dados na tabela 2.3.



Figura 2.16 Preparação de provetes para ensaio com reómetro de corte dinâmico

Tabela 2.3 Diâmetros dos pratos do reómetro de corte dinâmico

Diâmetro do provete (mm)	Espessura do provete (mm)	Gama de valores do módulo de rigidez (kPa)	Gama de temperaturas (°C)
8	1	100 - 10 000	5 - 20
25	2	1 - 100	20 - 80

Os ensaios realizados neste estudo foram desenvolvidos com o equipamento representado na figura 2.17, de acordo com as normas AASHTO TP5 (1998), EN 14770 (CEN, 2012) e ASTM D 7175-15 (2015).

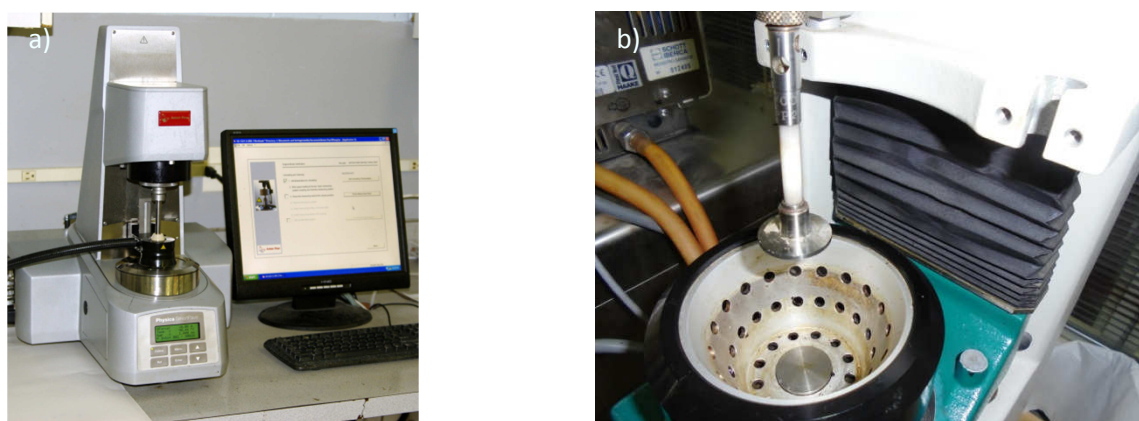


Figura 2.17 – a) Reómetro de corte dinâmico b) pormenor do equipamento utilizado

Na execução dos ensaios foram utilizados os seguintes parâmetros:

- ✓ carregamento oscilatório;
- ✓ tensão de corte máxima constante de 400 Pa para o betume modificado e respetivos mástiques e 300 Pa para o betume de pavimentação e mástiques com ele produzidos;
- ✓ vários patamares de frequência, começando pelo valor de frequência mais elevado 10 Hz e gradualmente diminuindo até se atingir a frequência mais baixa de 0,01 Hz.

Por forma a definir o nível de tensão a aplicar aos provetes, foram inicialmente realizados ensaios para diferentes valores da tensão de corte máxima aplicada ao provete (figura 2.18), procurando observar qual o máximo valor de tensão a aplicar para a qual o provete mantinha um comportamento viscoelástico linear. Obtêm-se, assim, valores do módulo complexo não afetados pela amplitude da tensão ou extensão aplicada, dependendo apenas da temperatura e da frequência aplicada.

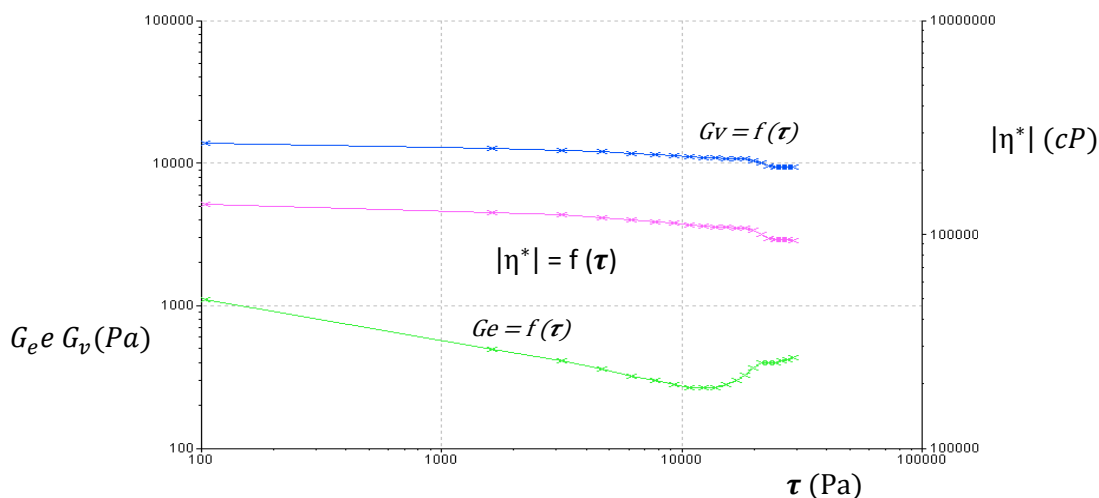


Figura 2.18 Valores da viscosidade complexa e das componentes elástica e imaginária da rigidez função da tensão de corte instalada

O equipamento permite quantificar o binário aplicado ao provete, a deformação angular e o tempo decorrido entre a aplicação do binário máximo e o momento em que se verifica a deformação máxima, parâmetros necessários para o conhecimento do ângulo de fase. Todos os equipamentos permitem realizar ensaios em tensão controlada ou extensão controlada, fazendo variar o valor máximo aplicado e a frequência de

aplicação. Permitem ainda fazer variar a temperatura de ensaio e a geometria de aplicação das ações ao provete: pratos paralelos, em cone ou cilindros coaxiais. A geometria dos pratos paralelos é a que é usada em ensaios com betumes, apesar de apresentar a desvantagem de a deformação não ser constante em todo o provete circular, observando-se que é nula no centro do círculo e máxima no seu perímetro.

Neste trabalho foram usados pratos paralelos, várias temperaturas e diferentes frequências, em modo de tensão constante para dois valores distintos da tensão máxima, função da resposta viscoelástica linear das amostras.

No cálculo da tensão máxima de corte (τ_0), extensão máxima (δ_0) e o módulo de corte complexo $|G^*|$, foram usadas respetivamente, as expressões 2.24, 2.25 e 2.26.

$$\tau_0 = \frac{2M}{\pi r^3} \quad [2.24]$$

$$\delta_0 = \frac{\theta_d r}{h} \quad [2.25]$$

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\delta_0} = \frac{2Mh}{\pi \theta_d r^4} \quad [2.26]$$

Em que:

M – Binário medido (N.mm);

r – Raio do prato (mm);

θ_d – Ângulo de deflexão (rad);

h – Afastamento dos pratos ou seja espessura do provete (mm).

O equipamento permite ainda a realização de ensaios de fadiga e de fluência que no entanto não foram realizados no presente trabalho.

A viscosidade a taxa de corte zero ZSV, “*Zero Shear Viscosity*”, é a viscosidade de um fluido em repouso e pode ser quantificada impondo uma deformação por corte a uma taxa de corte próxima de zero em reómetro de corte, através de ensaios de corte oscilatórios ou ensaios de fluência. O valor da viscosidade de um betume a taxa de

corte zero é característico do valor da rigidez do betume e da resistência do material às deformações permanentes para longos períodos de carregamento.

Ensaio realizado por De Visscher, *et al.*, em 2004 permitiram concluir da adequabilidade dos ensaios DSR para quantificação da viscosidade a taxa de corte zero, desde que o equipamento permita realizar ensaios para frequências muito baixas.

A quantificação laboratorial da viscosidade a taxa de corte muito baixas, próximas de zero, através da realização de ensaios oscilatórios ou de fluência para vários tipos de betume, permitiram obter resultados que apresentaram boa relação com ensaios laboratoriais de deformações permanentes em misturas betuminosas (Phillips & Robertus, 1996; Guericke, 2000).

No entanto, o valor da frequência a aplicar ao provete durante o ensaio, está limitada quer inferior quer superiormente. A maior parte dos reómetros de corte não permite fazer ensaios para frequências inferiores a 0,01 Hz, sendo usual extrapolar o valor da viscosidade a taxa de corte zero, utilizando o modelo de Cross dado pela expressão [2.9] já apresentada e que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\eta^*(\omega) = \frac{\eta_0^* - \eta_\infty^*}{1 + (k\omega)^m} + \eta_\infty^* \quad [2.27]$$

Porém, este modelo nem sempre conduz a resultados credíveis, nomeadamente para betumes modificados. Na realidade, o valor da viscosidade a taxa de corte zero de um betume modificado não é fácil de obter experimentalmente (figura 2.19).

Os valores da viscosidade obtidos para frequências muito baixas dependem significativamente de muitos fatores, como sejam (De Visscher *et al.*, 2004): temperatura e período de aquecimento da amostra para preparação dos provetes, temperatura do betume na moldagem dos provetes, taxa de arrefecimento até temperatura ambiente e tempo decorrido entre a moldagem dos provetes e a execução do ensaio. Todos estes aspetos originam grande dispersão nos valores obtidos da viscosidade para muito baixas frequências.

Resultados de ensaios com reómetro de corte, para diversos tipos de betume, apresentados por Nicholls em 2006, evidenciam boa correlação com os valores de rigidez observados para as misturas betuminosas produzidas com esses betumes.

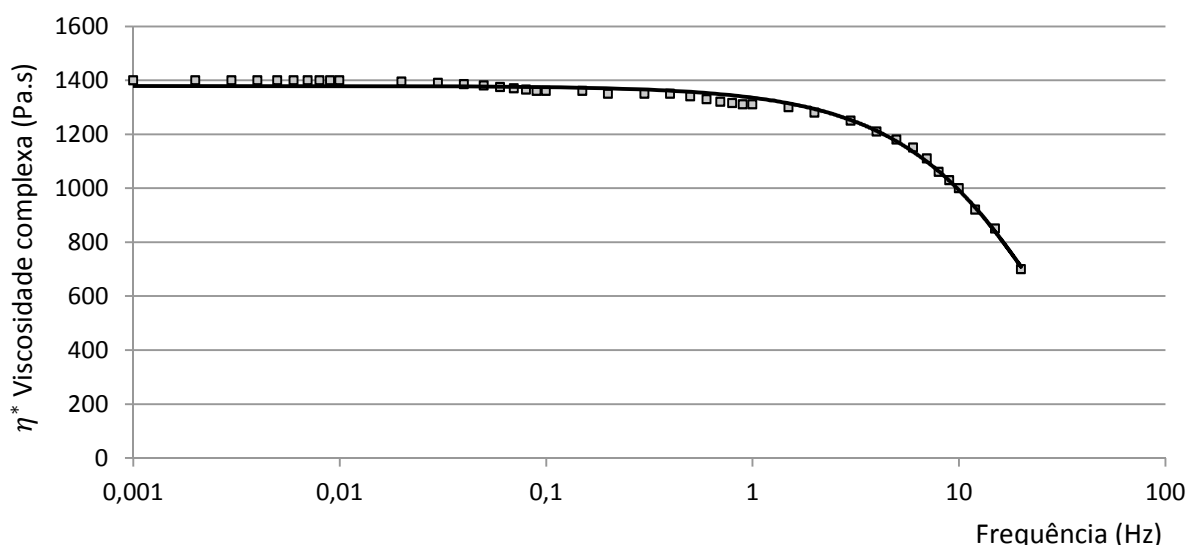


Figura 2.19 Variação da viscosidade complexa com a frequência de aplicação do carregamento

2.4.3. Metodologias para simular o envelhecimento em laboratório

Em termos químicos o envelhecimento do betume conduz a uma diminuição no teor em aromáticos e consequentemente a um aumento no teor em resinas, juntamente com um aumento do teor em asfaltenos. Assim, é consensualmente aceite que os aromáticos produzem resinas que por seu lado geram asfaltenos. Por seu lado, os saturados permanecem quase inalterados (Lesueur, 2009).

A relação ponderal entre as resinas e os asfaltenos é primordial para se manter o modelo coloidal inicial, pois se a concentração dos asfaltenos relativamente às resinas aumentar, irá ficar mais facilitada a condensação dos asfaltenos, acelerando-se assim o processo de envelhecimento.

Com o envelhecimento, o betume torna-se mais duro e mais brilhante, aumentando o risco da ruína da mistura betuminosa, através do fendilhamento e desprendimento, devido à rotura fragil, coesiva, do mástique betuminoso.

O envelhecimento artificial em laboratório aumenta o peso molecular do betume dado que aumenta a concentração das maiores moléculas, reduzindo a concentração das pequenas moléculas (Lu & Isacsson, 1999).

Ensaio de cromatografia de permeação em gel realizados por Moraes & Bahia em 2014, demonstraram que a utilização de filler nas misturas betuminosas diminui a taxa de produção de moléculas de maiores dimensões, resultantes da oxidação do betume, reduzindo assim o efeito do envelhecimento do ligante na mistura betuminosa.

Ensaio laboratoriais físicos como a penetração, temperatura anel e bola, viscosidade e avaliação do comportamento reológico com o reómetro de corte dinâmico, realizados com betume original e com betume envelhecido artificialmente em laboratório, permitem avaliar a maior ou menor suscetibilidade do betume ao envelhecimento.

Permitem ainda estudar os mástiques e a eficácia de aditivos do tipo rejuvenescedores, permitindo seleccionar, entre vários tipos de aditivos, aquele que melhor desempenho apresenta para determinado betume.

O envelhecimento do betume que ocorre ao longo da vida no pavimento é influenciado por diversos fatores: características e dosagem do ligante, natureza geológica do agregado e distribuição granulométrica das partículas, porosidade da mistura betuminosa, aspetos ligados com o processo de fabrico da mistura betuminosa e sua colocação na camada e as ações a que a mistura betuminosa vai estar sujeita, nomeadamente no que diz respeito ao tráfego, volume, carga e distribuição no tempo e às condições climáticas (Lu & Isacsson, 1999).

O envelhecimento sofrido pelo betume durante o seu armazenamento em central, fabrico da mistura betuminosa, conservação em stock, transporte, espera e aplicação da mistura em camada de pavimento, pode ser simulado laboratorialmente através de três metodologias, todas elas especificadas em documentos normativos europeus:

- ✓ EN 12607-1 (CEN, 2014) e ASTM D2872-12 (2012). Nesta metodologia, vulgarmente designada por RTFOT “*Rolling Thin-Film Oven Test*”, uma amostra de betume é colocada dentro de frascos de vidro cilíndricos, aos quais é imposto um movimento rotativo, de modo a formar uma película de betume pouco espessa, a qual é exposta, durante 75 min, dentro de equipamento apropriado (figura 2.20), a uma corrente de ar com um fluxo de 4 l/min e uma temperatura de 163 °C;

a)



b)



Figura 2.20 Câmara de envelhecimento de betumes RTFOT a) Vista geral www.matest.com/en/Products/---1/Macro-Category/rolling-thin-film-oven
b) pormenor www.gecil.com/index.php?pageID=54

- ✓ EN 12607-2 (CEN, 2014) e ASTM D1754-14 (2014). Este método é usualmente referido pela sigla TFOT “*Thin-Film Oven Test*” e consiste basicamente em colocar uma amostra de betume em taças, numa espessura de 3 mm, dentro de uma estufa (fig 2.21) e exposto a uma temperatura de 163 °C durante 5 horas;
- ✓ EN 12607-3 (CEN, 2014). Neste método, RFT “*Rotating Flask Test*”, o betume é colocado num balão de vidro, ao qual é imposto um movimento rotativo num ângulo de 45 °, dentro de um banho de óleo, a uma temperatura de 165 °C e submetido a uma corrente de ar (figura 2.22).

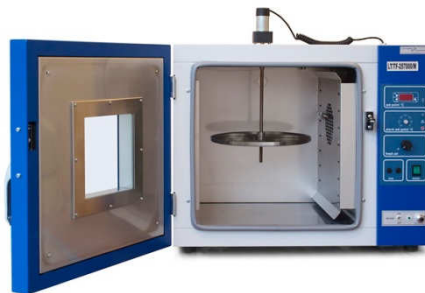


Figura 2.21 - Estufa para ensaio de envelhecimento de betumes (TFOT)
www.lin-tech.ch/english/tf257000eng.html



Figura 2.22 - Equipamento para envelhecimento de betume pelo método RFT
www.matest.com/en/Products/----1/Macro-Category/bituminous-binders-determination-of-the-resistance-of-hardening-rotating-flask-test-rft-me/b065-rotary-evaporation-apparatus

Após a exposição do betume a estas condições forçadas por um destes métodos, a suscetibilidade ao envelhecimento do betume é geralmente avaliada, através da quantificação de três parâmetros: perda de massa observada durante o ensaio, aumento da temperatura anel e bola e penetração conservada pelo betume.

O envelhecimento de um betume provocado pelo método RTFOT, não altera a quantidade de resinas presentes no betume, mas conduz a um aumento significativo de asfaltenos e a uma perda ainda mais evidente de aromáticos (Buisson *et al.*, 2009), situação esta que na realidade se verifica em todo o processo associado ao fabrico de uma mistura betuminosa a quente, aspeto pelo qual o método se encontra normalizado e os valores obtidos devidamente especificados na norma de produto.

Vários autores (Huang *et al.*, 1996; Phromsorn & Kennedy, 1995) concluíram que o método RTFOT conduz a um maior envelhecimento que a metodologia TFOT. A mesma conclusão foi estabelecida em 1997 por Scarlett através da realização de ensaios de penetração para vários tipos de betumes. Complementarmente, ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório por estes dois métodos realizados em 1999 por Lu & Isacson, em betumes modificados com SBS “*Styrene-Butadiene-Styrene*”, permitiram concluir que o RTFOT é mais severo, no que diz respeito ao envelhecimento por oxidação, observando uma relação linear entre os dois métodos, mas menos severo no que toca à degradação do polímero do betume.

Por outro lado, o envelhecimento do betume de uma mistura betuminosa, aplicada em camada de pavimento verificado ao fim da vida útil de um pavimento, pode ser simulado em laboratório através de duas metodologias previstas na normalização europeia:

- ✓ EN 14769 (CEN, 2012). Esta metodologia de ensaio, designada por PAV “*Pressure Ageing Vessel*”, encontra-se igualmente descrita na norma americana ASTM D6521-13 (2013);
- ✓ EN 15323 (CEN, 2007). Esta metodologia é designada por RCAT “*Rotating Cylinder Aging Test*”.

Basicamente o método PAV consiste em expor o betume, após sujeito a envelhecimento a curto prazo por um dos métodos descritos anteriormente, a uma pressão de 2,1 MPa, temperatura previamente selecionada entre 85 e 110 °C e durante um determinado período de tempo, geralmente 20 h, em equipamento apropriado capaz de resistir à elevada pressão a que é exposta a amostra de betume (figura 2.23). A metodologia SHRP, onde o ensaio foi desenvolvido, admite que a exposição a envelhecimento acelerado para uma temperatura de 90 °C, durante 20 h, equivale ao envelhecimento sofrido pelo betume colocado no pavimento durante 20 anos em serviço.

Não obstante, alguns autores Lu *et al.* em 2010 observaram que esta metodologia não prevê convenientemente o envelhecimento dos betumes modificados com polímeros do tipo SBS, recomendando a adoção, para o caso destes betumes, de outros parâmetros,

nomeadamente o tempo e a temperatura de ensaio, de modo a obter um estado de envelhecimento mais adequado.



Figura 2.23 Equipamento de envelhecimento PAV

A exposição do betume ao ensaio PAV provoca um aumento significativo das resinas, uma perda de aromáticos e um aumento dos asfaltenos, variações estas não tão acentuadas como as verificadas no ensaio RTFOT (Buisson *et al.*, 2009).

O método RCAT foi desenvolvido pelo BRRC “*Belgium Road Research Center*” e consiste em colocar a amostra de betume a ensaiar num recipiente metálico, no qual se encontra mergulhado um cilindro, igualmente metálico, de eixo horizontal, ao qual é aplicado um movimento rotativo, observando-se ao longo do ensaio, o revestimento da superfície de revolução do cilindro de uma camada pouco espessa de betume. O sistema é mantido dentro de uma câmara, onde é introduzido oxigénio, por forma a acelerar a oxidação do betume e em condições de temperatura e duração determinadas (figura 2.24).

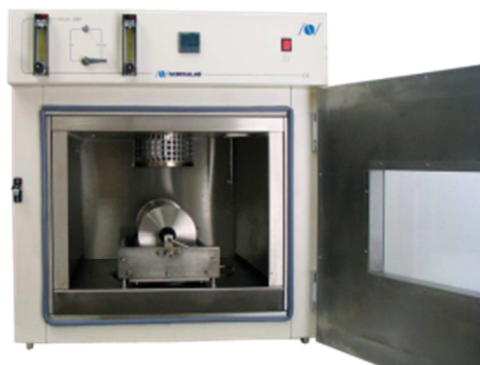


Figura 2.24 Equipamento de envelhecimento RCAT

www.normalab.com/index.php/en/detail-produit-en?idprod=167&r=rcat#page_detail_produit

Refira-se ainda que estas duas metodologias PAV e RCAT permitem, conjugando a temperatura e o tempo de exposição, simular os dois envelhecimentos, a curto prazo no fabrico e a longo prazo em serviço, dispensando assim a metodologia RTFOT.

Em 2011, Muller & Jenkins realizaram ensaios comparativos, utilizando os métodos RTFOT e PAV, para vários betumes. Os autores prolongaram o tempo de exposição ao envelhecimento no RTFOT, procurando obter apenas por esta metodologia, o mesmo nível de envelhecimento obtido por aplicação dos dois métodos.

O efeito do envelhecimento artificial dos betumes modificados é fortemente dependente do tipo de polímero utilizado na modificação do betume. A comprovar este aspeto estão os resultados obtidos em ensaios de penetração e temperatura anel e bola realizados em 2005 por Verhasselt, em diferentes laboratórios para diferentes tipos de betume e após envelhecimento RCAT a 90 °C de temperatura ao fim de 17, 65 e 140 h de exposição, que mostraram valores relativamente elevados para a dispersão de valores no caso de betumes modificados com polímeros do tipo EVA "*Ethylene-Vinyl-Acetate*". Resultados de ensaios realizados em 2003, pelo mesmo investigador, Verhasselt, a diversos tipos de betumes e mesmo para mástique betuminosos, mostram que o envelhecimento obtido em RTFOT a 163 °C de temperatura, durante 75 min, é equivalente ao envelhecimento obtido em RCAT para a mesma temperatura durante cerca de 230 min.

2.5. Tipos de betumes

Existem hoje muitos tipos de betumes para utilização em misturas betuminosas. Neste ponto são apresentados os betumes de utilização mais corrente em Portugal, dando principal pormenorização aos betumes utilizados na parte experimental deste trabalho.

2.5.1. Betumes de pavimentação e betumes duros

O processo de fabrico, descrito no início do ponto 2.1, diz respeito apenas aos betumes obtidos da destilação do crude do petróleo, realizada em refinarias, por fracionamento à pressão atmosférica, e fracionamento em vácuo. Estes betumes tomam a designação de betumes de pavimentação quando apresentam valores de penetração entre 20 e 220 (0,1 mm), e betumes duros para valores de penetração entre 10 e 25 (0,1 mm). Os betumes de pavimentação encontram-se regulamentados a nível europeu, através da

norma europeia EN 12591 (CEN, 2009), enquanto a norma europeia EN 13924 (CEN, 2006) regulamenta os betumes duros.

A caracterização laboratorial para os betumes de pavimentação e betumes duros, prevista na normalização europeia, é realizada ainda por uma metodologia empírica e compreende a realização de uma série de ensaios, por forma a avaliar o comportamento mecânico a diferentes temperaturas, a suscetibilidade ao envelhecimento, a existência de materiais inorgânicos indesejáveis não dissolvidos e, ainda, por razões de segurança, ensaios de avaliação da temperatura de inflamação.

Os ensaios empíricos para avaliação do comportamento do betume a diferentes temperaturas em serviço são os seguintes (figura 2.25):

- ✓ muito baixas temperaturas, ensaio de temperatura de fragilidade Fraass, EN 12593 (CEN, 2015);
- ✓ baixas temperaturas, ensaio de penetração EN 1426 (CEN, 2015);
- ✓ Elevadas temperaturas, ensaio de temperatura anel e bola EN 1427 (CEN, 2015).

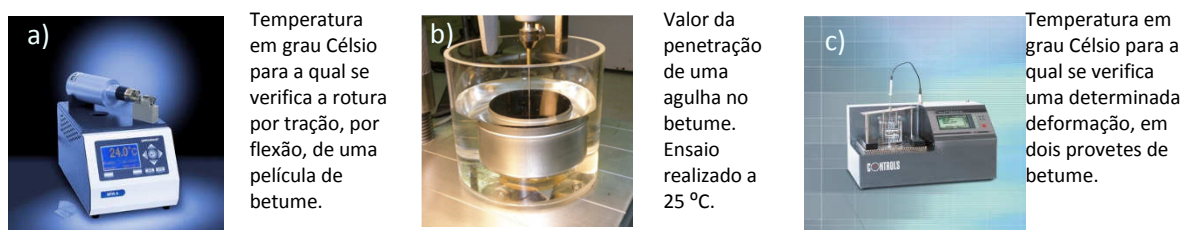


Figura 2.25 a) **Ensaio Fraass** www.directindustry.com/industrial-manufacturer/test-device-75330.html b) **Ensaio de penetração** www.priasphalt.com/testingandspecifications.aspx?id=733 c) **Ensaio temperatura anel e bola** www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/pavelab-automatic-ring-and-ball-apparatus.php

A avaliação do comportamento de um betume, função da temperatura, fica completa, com o conhecimento da sua viscosidade cinemática à temperatura de 135 °C, através do ensaio com viscosímetro capilar (figura 2.26) de acordo com a norma EN 12595 (CEN, 2014).

Por razões de segurança é ainda avaliado o ponto de inflamação, ou seja, a temperatura a partir da qual o betume liberta vapores inflamáveis (figura 2.27). Esta avaliação é realizada de acordo com a norma europeia EN ISO 2592 (CEN, 2001).



O tempo que determinada quantidade de betume demora escoar num viscosímetro capilar é utilizado para calcular a viscosidade cinemática do betume, temperatura de ensaio 135 °C



Temperatura em grau Célzio para a qual se verifica a libertação de vapores inflamáveis

Figura 2.26 Ensaio viscosidade cinemática
www.khushbooscientific.com/Oil-Petroleum-Bitumen-Concrete-Test-Instruments.htm

Figura 2.27 Ensaio ponto de inflamação
www.anton-paar.com/no-en/products/details/cla-5/volatility/

A caracterização laboratorial dos betumes prevê ainda a avaliação da solubilidade do betume num solvente, segundo a norma EN 12592 (CEN, 2014), de modo a avaliar se a amostra diz respeito a um material orgânico, homogéneo e não contém matérias inorgânicas não dissolvidas, tais como fileres.

Complementarmente, o caderno de encargos da IP, S. A. (Estradas de Portugal, 2012) prevê ainda a determinação do teor em parafinas pelo método de extração, segundo a metodologia descrita na norma europeia de ensaio EN 12606-2 (CEN, 1999).

Em Portugal, os betumes de pavimentação utilizados em misturas betuminosas são os previstos no caderno de encargos tipo da IP, S. A. (Estradas de Portugal, 2012), e dizem respeito às classes 35/50 e 50/70. Na tabela 2.4 são apresentados os valores exigidos para as diferentes características para estas duas classes de betume.

Tabela 2.4 Requisitos dos betumes de pavimentação segundo o IP, S.A. (Estradas de Portugal, 2012)

Propriedades	Método de ensaio	Unidade	35/50	50/70
P - Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	35 - 50	50 - 70
t_{RAB} - Temperatura anel e bola	EN 1427	°C	50 - 58	46 - 54
Penetração retida	EN 12607-1	%	≥ 53	≥ 50
Aumento da temperatura anel e bola		°C	≤ 8	≤ 9
Variação em massa		%	≤ 0,5	≤ 0,5
Ponto de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 240	≥ 230
Solubilidade	EN 12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0
Viscosidade cinemática a 135 °C	EN 12595	mm ² /s	≥ 370	≥ 295
Teor em parafinas	EN 12606-2	% (m/m)	≤ 4,5	≤ 4,5

O betume 35/50, relativamente ao betume 50/70, possui valores de penetração mais baixos pelo que se apresenta mais duro, observando menor resistência ao fendilhamento por baixas temperaturas, mas uma menor suscetibilidade às deformações permanentes por efeito de temperaturas elevadas em serviço (Fazaeli *et al.*, 2012).

Para além dos betumes deverem cumprir com os limites apresentados, devem ainda ser fornecidos os valores da temperatura de fragilidade Fraass, obtidos através do ensaio descrito na norma europeia EN 12593 (CEN, 2015) e do índice de penetração (IP), calculado de acordo com o anexo A da norma europeia EN 12591 (CEN, 2009), dado pela expressão [2.28]. Esta mesma norma especifica que os betumes de pavimentação devem apresentar valores de IP entre o intervalo de valores -1,5 e +0,7.

$$Ip = \frac{20 t_{R\&B} + 500 \log P - 1952}{t_{R\&B} - 50 \log P + 120} \quad [2.28]$$

Este parâmetro, inicialmente definido por Pfeiffer & Van Doormaal em 1936, permite concluir sobre a suscetibilidade de um betume à temperatura, verificando-se o aumento da suscetibilidade, quanto maior o valor do módulo do índice de penetração. Betumes de elevado índice de penetração apresentam maiores concentrações de asfaltenos e, conseqüentemente, menores concentrações de aromáticos, verificando-se um comportamento GEL para valores de índice de penetração superiores a 2 e um comportamento SOL para valores inferiores a zero (Lesueur, 2009).

Os ligantes hidrocarbonatados apresentam valores IP entre -2 e 2, sendo que valores de IP inferiores a -2 são observados em alcatrões muito suscetíveis à temperatura e valores superiores a 2 são característicos de betumes oxidados (Phillips & Robertus, 1996).

De referir que o cumprimento dos intervalos estabelecidos para a penetração e a temperatura anel e bola não garante que o betume cumpra com o intervalo estabelecido para o índice de penetração. Para valores de penetração e temperatura anel e bola próximos dos respetivos limites inferiores verificam-se valores de índice de penetração inferiores a -1,5, conforme pode ser observado pelos valores constantes da tabela 2.5.

Tabela 2.5 Valores possíveis do índice de penetração para os betumes 35/50 e 50/70

Tipo de betume	Betume 35/50								Betume 50/70										
P (0,1 mm)	t _{RaB} (°C)								P (0,1 mm)	t _{RaB} (°C)									
	50	51	52	53	54	55	56	57		46	47	48	49	50	51	52	53	54	
35	-1,9	-1,7	-1,5	-1,2	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	50	-2,2	-2,0	-1,7	-1,4	-1,2	-1,0	-0,7	-0,5	-0,2	
36	-1,9	-1,6	-1,4	-1,2	-1,0	-0,7	-0,5	-0,3	51	-2,2	-1,9	-1,7	-1,4	-1,2	-0,9	-0,7	-0,4	-0,2	
37	-1,8	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	52	-2,2	-1,9	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,2	
38	-1,8	-1,5	-1,3	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,2	53	-2,1	-1,8	-1,6	-1,3	-1,1	-0,8	-0,6	-0,3	-0,1	
39	-1,7	-1,5	-1,3	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	54	-2,1	-1,8	-1,5	-1,3	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	-0,1	
40	-1,7	-1,4	-1,2	-1,0	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	55	-2,0	-1,8	-1,5	-1,2	-1,0	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	
41	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	56	-2,0	-1,7	-1,5	-1,2	-0,9	-0,7	-0,4	-0,2	0,0	
42	-1,6	-1,3	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	57	-2,0	-1,7	-1,4	-1,2	-0,9	-0,6	-0,4	-0,2	0,1	
43	-1,5	-1,3	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,1	58	-1,9	-1,6	-1,4	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	
44	-1,5	-1,2	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	59	-1,9	-1,6	-1,3	-1,1	-0,8	-0,6	-0,3	-0,1	0,2	
45	-1,4	-1,2	-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,2	60	-1,8	-1,6	-1,3	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,2	
46	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,4	-0,2	0,0	0,2	61	-1,8	-1,5	-1,3	-1,0	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	
47	-1,3	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,3	62	-1,8	-1,5	-1,2	-0,9	-0,7	-0,4	-0,2	0,1	0,3	
48	-1,3	-1,0	-0,8	-0,6	-0,3	-0,1	0,1	0,3	63	-1,7	-1,4	-1,2	-0,9	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,3	
49	-1,2	-1,0	-0,8	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,4	64	-1,7	-1,4	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,4	
50	-1,2	-1,0	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,2	0,4	65	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,3	-0,1	0,2	0,4	
									66	-1,6	-1,3	-1,1	-0,8	-0,5	-0,3	0,0	0,2	0,5	
									67	-1,6	-1,3	-1,0	-0,8	-0,5	-0,2	0,0	0,3	0,5	
									68	-1,5	-1,3	-1,0	-0,7	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,5	
									69	-1,5	-1,2	-0,9	-0,7	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,6	
									70	-1,5	-1,2	-0,9	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,4	0,6	

Alguns autores procuraram estabelecer leis, com as quais fosse possível obter, a partir do conhecimento do valor da penetração do betume, as suas características fundamentais:

- ✓ Saal & Koens em 1933 apresentaram uma equação [2.29] que permite, segundo os autores, através do valor da penetração do betume, obter a sua viscosidade em Pascal segundo;
- ✓ Van der Poel em 1954 estabeleceu uma correlação [2.30], entre a penetração de um betume e o seu módulo de elasticidade após aplicação de um carregamento durante 0,4 s.

$$\eta = A P^{-b} \quad [2.29]$$

$$E(0,4 \text{ s}) = 1,62 \times 10^9 P^{-1,85} \quad [2.30]$$

Em que:

A - Constante igual a 8×10^8 , para P entre 180 e 200 (0,1 mm) e 10×10^8 para P entre 40 e 50 (0,1 mm);

b – Constante igual a 2;

E(0,4 s) – Módulo de elasticidade em Pascal após 0,4 s de carregamento.

No entanto, muito tempo já passou desde as datas em que estas equações foram estabelecidas, verificando-se uma evolução tecnológica muito acentuada na produção de betumes, quer para os betumes de pavimentação quer para os betumes modificados, pelo que estas expressões não são mais utilizadas.

Em termos de viscosidade do betume é comum fixarem-se algumas exigências, como forma de assegurar o bom comportamento da mistura betuminosa na camada do pavimento. Esses requisitos são três:

- ✓ garantir a bombagem do betume na central de misturas betuminosas é corrente utilizar um valor de temperatura por forma a limitar a viscosidade do betume a 3 Pa.s;
- ✓ assegurar um bom comportamento às deformações permanentes, deve ser limitado inferiormente o valor da componente elástica da rigidez, quer do betume não envelhecido, sendo neste caso a exigência de $G^*/\sin \emptyset > 1$ kPa, quer para o betume envelhecido em RFOT, sendo a exigência para esta condição $G^*/\sin \emptyset > 2,2$ kPa;
- ✓ assegurar um bom comportamento à fadiga, deve ser limitado superiormente o valor da componente viscosa da rigidez para o valor de 5000 kPa, ou seja, $G^* \cdot \sin \emptyset < 5000$ kPa (Buisson et al., 2009).

Quanto aos betumes duros, o caderno de encargos do IP,S.A. (Estradas de Portugal, 2009) apenas prevê para as estradas portuguesas a utilização do betume 10/20, e apenas para a utilização no fabrico de misturas betuminosas de alto módulo. Na tabela 2.6 são apresentados os valores exigidos para este tipo de betume.

Tabela 2.6 Requisitos do betume duro 10/20 segundo o IP, S.A. (Estradas de Portugal, 2012)

Propriedades	Método de ensaio	Unidade	10/20
P - Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	10 - 20
t _{RaB} - Temperatura anel e bola	EN 1427	°C	60 - 76
Penetração retida	EN 12607-1	%	≥ 55
Aumento da temperatura anel e bola		°C	≤ 10
Variação em massa		%	≤ 0,5
Ponto de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 245
Solubilidade	EN 12592	%	≥ 99,0
Viscosidade cinemática a 135 °C	EN 12595	mm ² /s	≥ 700
Teor em parafinas	EN 12606-2	% (m/m)	≤ 4,5
Índice de penetração	EN 12591	--	de -1,5 a +0,7

2.5.2. Betumes modificados

Há muito se conhecem estudos no sentido de se adicionar ao betume outros produtos para se alterar as características do betume original. A adição de borracha a um betume nasceu em 1843, se bem que o objetivo na altura seria o de se conseguir um substituto para a borracha e não propriamente modificar o betume. Mas o verdadeiro início da comercialização e aplicação de betumes modificados verifica-se em 1970.

Segundo a EN 12597 (CEN, 2014) um betume modificado pode ser definido com um betume cujas propriedades reológicas foram modificadas durante o fabrico pela utilização de um ou mais agentes químicos. As fibras e os fileres não são considerados modificadores do betume. Por outro lado, segundo a mesma norma, entende-se por betume modificado por polímeros, PMB "*Polimer Modified Bitumen*" o betume modificado em que o modificador utilizado é um ou vários polímeros orgânicos.

Pretende-se com a modificação dos betumes obter ligantes com melhor desempenho ao nível das características reológicas a elevadas temperaturas e das propriedades em termos de rotura frágil a baixas temperaturas, bem como obter um melhor comportamento no que diz respeito ao envelhecimento (Branco *et al.*, 2006).

Nesta mesma publicação os autores identificam os vários polímeros utilizados na modificação de betumes:

- ✓ borrachas sintéticas ou naturais tais como estireno-butadieno, copolímeros tais como, estireno-butadieno-estireno (SBS), vulgarmente designados por elastómeros;
- ✓ etileno-acetato de vinilo (EVA) ou moléculas relacionadas, vulgarmente designadas por plastómeros;
- ✓ poliolefinas, tais como o polietileno (PE) e o polipropileno (PP);
- ✓ terpolímeros aleatórios, compreendendo o etileno, o glicidilmetacrilato e um grupo ester (usualmente metilo, etilo ou butilacrilato);
- ✓ enxofre, borrachas, fibras orgânicas ou inorgânicas, resinas e endurecedores;
- ✓ ácidos polifosfóricos.

A generalidade da investigação realizada através de estudos laboratoriais evidenciam que a modificação dos betumes, com qualquer um dos agentes modificadores mencionados, resulta num melhor desempenho a altas e baixas temperaturas do betume modificado relativamente ao ligante original.

Orange *et al.*, demonstraram, através de ensaios laboratoriais realizados em 2004, que os aditivos do tipo ácidos polifosfóricos, relativamente ao betume original, aumentam a viscosidade a elevadas temperaturas, reduzem o índice de penetração, sugerindo assim uma menor suscetibilidade do ligante, aumentam a rigidez e reduzem o ângulo de fase.

Aos betumes modificados estão associadas alterações à reologia do betume, nomeadamente no aumento quer da rigidez quer da componente elástica, especialmente para elevadas temperaturas em serviço, contribuindo assim para um melhor comportamento da mistura betuminosa em termos de suscetibilidade às deformações permanentes. Observa-se, igualmente, um menor envelhecimento do betume por redução da oxidação verificada no pavimento (Alencar *et al.*, 2009).

Dado que num betume modificado com polímero, este componente não se mistura com os asfaltenos, observa-se uma separação de fases: por um lado, o polímero aumenta de volume devido às moléculas mais leves dos componentes aromáticos dos maltenos do betume, fazendo com que o volume do polímero cresça de 4 a 10 vezes quando disperso no betume e, por outro lado, os asfaltenos dispersos na fração de maltenos remanescente.

Imagens microscópicas de betumes modificados realizadas por Fernandes em 2007, revelaram a formação de sistemas multifásicos contendo uma fase rica em polímeros e uma outra rica em asfaltenos não absorvidos pelos polímeros.

Dado que os betumes modificados utilizados em pavimentação apresentam sempre uma baixa taxa de incorporação de polímeros, o betume modificado apresenta-se como que uma emulsão com a fração mais rica em polímero PRP "*Polymer-Rich Phase*" dispersa na fase rica em asfaltenos ARP "*Asphaltene-Rich Phase*".

Pretende-se com a incorporação de polímeros no betume não uma completa solubilização do polímetro no betume, caso em que as propriedades do betume modificado seriam praticamente as mesmas do betume original, mas sim preferindo-se uma miscibilidade parcial do polímero no betume.

A miscibilidade parcial do polímero no betume torna o estudo da compatibilidade dos dois materiais uma matéria nem sempre fácil de solucionar. A compatibilidade entre o betume e o polímero é normalmente definida por um sistema que se pretende homogéneo, de um ponto de vista macroscópico, mas heterogéneo do ponto de vista microscópico. Assim, a seleção do tipo de polímero a utilizar na modificação de um determinado betume encontra-se restrita a um número muito reduzido de famílias de polímeros. O conhecimento da composição química do betume é fundamental para prever se determinado polímero é compatível. Não existe, no entanto, uma receita, sendo a formulação previamente definida mais com base na experiência do que propriamente por métodos teóricos. Contudo, alguns princípios são normalmente aceites:

- ✓ betumes com elevada dosagem de asfaltenos apresentam menor compatibilidade;
- ✓ a aromaticidade dos maltenos necessita diminuir para determinados valores para se conseguir uma boa compatibilidade entre o polímero e o betume.

Como consequência de um aumento da quantidade de aromáticos necessários para inchar o polímero a matriz torna-se mais pobre em maltenos e mais rica em asfaltenos, observando-se assim um aumento do endurecimento do betume resultante. Por outro lado, os aromáticos por conterem elevada concentração de anéis de benzeno fluorescentes, ao verem a sua concentração aumentada nos betumes modificados, são responsáveis pelo aparecimento da cor amarela na microscopia de fluorescência. Utiliza-se, assim, esta metodologia para observar os betumes modificados, nomeadamente para avaliar a dosagem de polímero existente na amostra.

Os betumes modificados são recomendados para o fabrico de misturas betuminosas do tipo abertas, pois este tipo de betume é menos suscetível ao envelhecimento que os betumes não modificados, contribuindo assim para a durabilidade da mistura no que diz respeito à ruína por fendilhamento ou ravinamento. Por outro lado, aos betumes modificados está associado o aumento da vida útil das misturas betuminosas

descontínuas, dado que são geralmente indicadas melhores propriedades de adesão e coesão das misturas betuminosas bem como ser possível adotar um aumento da espessura do filme de betume sem que ocorra a segregação do material (Lu *et al.*, 2010).

O envelhecimento dos betumes modificados com polímeros quer devido à oxidação, quer devido à degradação do polímero, ocorre em grande parte durante o processo de fabrico transporte e colocação da mistura betuminosa e durante o primeiro ano de serviço (Lu *et al.*, 2010).

Os betumes modificados encontram-se regulamentados através da norma europeia EN 14023 (CEN, 2010). Na tabela 2.7 são apresentadas as especificações definidas para os betumes modificados a empregar em Portugal, especificações essas regulamentadas através do anexo técnico nacional da norma NP EN 14023 (IPQ, 2013).

Tabela 2.7 Especificações dos betumes modificados (IPQ, 2013)

Tipo de betume			PMB 10/40-70	PMB 25/55-65	PMB 45/80-60	PMB 45/80-65	PMB 45/80-75	PMB 65/105-80
Propriedades	Método de ensaio	Unidade	Especificações					
Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	10-40	25-55	45-80	45-80	45-80	65-105
Temperatura R&B	EN 1427	°C	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 65	≥ 75	≥ 80
Coesão – Força ductilidade (tração a 50 mm/min)	EN 13589 / EN 13703	J/cm ²	≥ 2 a 15 °C	≥ 2 a 10 °C	≥ 2 a 5 °C	≥ 3 a 5 °C	≥ 3 a 5 °C	≥ 3 a 5 °C
Resistência ao envelhecimento								
Penetração retida	EN 12607-1	%	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 50
Aumento da temperatura R&B		°C	≤ 8	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8
Variação em massa (valor absoluto)		%	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 0,3
Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235
Temperatura de fragilidade Fraass	EN 12593	°C	≤ -5	≤ -7	≤ -12	≤ -15	≤ -15	≤ -10
Recuperação elástica a 25 °C	EN 13398	%	AR ^a	≥ 50	≥ 50	≥ 70	≥ 80	≥ 70
Estabilidade ao armazenamento	EN 13399	°C	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Variação da temperatura R&B ou variação na penetração	EN 1427 EN 1426	0,1 mm	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 9

^a Nível ou intervalo a reportar pelo fornecedor

As metodologias para estudar as alterações observadas pela modificação de um betume são geralmente as seguintes (Lu & Isacsson, 1999):

- ✓ espectroscopia por infravermelhos por transformada de Fourier (FTIR);
- ✓ microscopia de força atômica (AFM);
- ✓ reómetro de corte dinâmico (DSR);

- ✓ cromatografia de camada fina com detetor de ionização de chama (TLC-FID);
- ✓ cromatografia de permeação de gel de alto desempenho (HP-GPC).

O comportamento ductil do betume modificado é avaliado de acordo com a metodologia descrita na norma EN 13589 (CEN, 2008), através da medição da energia de deformação observada por um provete tracionado.

A rotura elástica de um betume modificado é quantificada através da metodologia descrita na norma EN 13398 (CEN, 2010). O resultado do ensaio representa, em percentagem, o valor do comprimento recuperado pelo provete, previamente estirado em determinadas condições de força e temperatura e permite conhecer, se bem que de forma aproximada, a resposta elástica do betume.

Um dos riscos associados à introdução de polímeros no betume consiste no facto de se poder verificar a sedimentação do polímero durante o armazenamento do betume. Este risco é avaliado, através do ensaio preconizado na norma EN 13399 (CEN, 2010), pela diferença de resultados obtidos em ensaios de temperatura anel e bola ou de penetração, em duas amostras de betume distintas, recolhidas nas extremidades de um tubo que contém a amostra, e que foi previamente colocado em estufa, à temperatura de 180 °C, durante três dias na posição vertical.

Os betumes borracha são considerados betumes modificados especiais e são ligantes obtidos através da adição de granulado de borracha ao betume. Esta técnica é normalmente designada por via húmida, existindo uma outra forma de adicionar o granulado de borracha, durante o fabrico da mistura betuminosa, ao mesmo tempo que os agregados são envolvidos pelo betume, designando-se esta técnica por via seca.

Este tipo de betumes apresenta, normalmente, menores valores de rigidez a baixas temperaturas e maiores valores a elevadas temperaturas, melhorando assim o comportamento das misturas betuminosas no que diz respeito ao fendilhamento por baixas temperaturas e às deformações permanentes. Este comportamento foi observado em estudos realizados para betumes do tipo 50/70 de várias origens, com e sem borracha, que permitiram concluir que os betumes com borracha estudados possuem propriedades reológicas superiores aos betumes sem modificação por granulado de borracha (Victoria & Estébanez, 2009).

Apesar de se conseguir uma boa dispersão do granulado de borracha no betume, o facto de a borracha possuir partículas com diâmetros de algumas centenas de

micrometros, podendo mesmo observarem-se diâmetros da ordem do milímetro, faz com que algumas metodologias de ensaio, utilizadas na caracterização dos betumes não modificados com borracha, se tornem de execução muito difícil, observando-se grande dispersão nos resultados obtidos.

Dado não existir uma norma de produto para os betume modificados com borracha e porque estes apresentam uma utilização alargada em Portugal, a comissão técnica portuguesa CT 153, ligantes betuminosos, decidiu elaborar uma norma portuguesa, no sentido de regulamentar este tipo de produto. A norma NP 4501 (IPQ, 2013) define betume borracha, de sigla BB, como sendo um betume fabricado com a incorporação de granulado de borracha, por via húmida, usando borracha reciclada de pneus usados, apresentando características elastoméricas.

Este documento normativo define ainda três tipos de betume borracha:

- ✓ alta percentagem de granulado de borracha, igual ou superior a 18%, em relação à massa total de ligante, conduzindo a um betume de alta viscosidade, designado pela sigla BBA.
- ✓ média percentagem de granulado de borracha, entre 10 a 14%, em relação à massa total de ligante, conduzindo a um betume de média viscosidade, designado por BBM;
- ✓ baixa percentagem de granulado de borracha, igual ou inferior a 8%, em relação à massa total de ligante, conduzindo a um betume de baixa viscosidade, designado pela sigla BBB.

Quanto ao modo de fabricar o betume borracha, ele pode ser produzido em fábrica ou no local da produção das misturas betuminosas, ou seja, “*in situ*”, devendo ser este último método o selecionado no fabrico dos betumes de alta percentagem de granulado de borracha.

As especificações para estes tipos de betumes são indicadas na norma portuguesa e são apresentadas na tabela 2.8.

2.6. Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as propriedades dos betumes, com especial enfoque aos aspetos químicos, nomeadamente no que diz respeito à presença de parafinas nos betumes, viscosidade, comportamento reológico e aos aspetos relacionados com o seu envelhecimento, a curto e a longo prazo.

Tabela 2.8 Especificações dos betumes borracha (IPQ, 2013)

Tipo de betume modificado			BBB 35/50	BBB 50/70	BBM 35/50	BBM 50/70	BBA 35/50	BBA 50/70
Propriedades	Método de ensaio	Unidades	Especificações					
Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	35 - 50	50 - 70	35 - 50	50 - 70	15 - 30	20 - 35
Temperatura R&B	EN 1427	°C	≥ 58	≥ 53	≥ 65	≥ 58	≥ 68	≥ 65
Temperatura de fragilidade Fraass	EN 12593	°C	≤ - 5	≤ - 8	≤ - 8	≤ - 10	---	---
Viscosidade dinâmica a 175 °C	EN 13302	mPa.s	≥ 250	≥ 150	≥ 300	≥ 250	2500 a 4500	2500 a 4500
Varição de massa após RTFOT, 163°C	EN 12607-1	%	≤ + 1,0	≤ + 1,0	≤ + 0,8	≤ + 1,0	≤ + 0,8	≤ + 0,8
Penetração retida após RTFOT, 163 °C (25 °C, 100 g, 5 s)		%	≥ 65	≥ 60	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 60
Aumento da temperatura R&B após RTFOT, 163 °C		°C	≥ - 4 ≤ + 8	≥ - 5 ≤ + 10	≥ - 4 ≤ + 8	≥ - 5 ≤ + 10	≤ - 12 ≥ + 12	≤ - 12 ≥ + 12
Estabilidade ao armazenamento	Diferença da temp. R&B	EN 13399 + EN 1427	°C	≤ 10	≤ + 8	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Diferença da penetração	EN 13399 + EN 1426	0,1 mm	≤ 8	≤ + 10	≤ 8	≤ + 10	≤ 8
Recuperação elástica, alongamento 20 cm, a 25 °C	EN 13398	%	≥ 10	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 75	≥ 75
Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235

Foram apresentados os diferentes tipos de betumes, puros e modificados, identificando para cada um deles, as especificações exigidas na normalização portuguesa e europeia em vigor.

Sendo uma parte importante deste trabalho dedicada ao estudo laboratorial do comportamento dos materiais, considerou-se relevante apresentar neste capítulo, as metodologias previstas na normalização europeia, para a caracterização laboratorial dos betumes, com especial relevo para os métodos utilizados neste estudo.

No trabalho experimental foram selecionados dois betumes: um betume puro 35/50 e um betume modificado PMB 45/80-60, por se tratarem dos betumes de maior aplicação em Portugal. O betume puro foi utilizado nas misturas betuminosas densas, do tipo betão betuminoso, e o betume modificado foi o adotado para as misturas betuminosas drenantes.

Para o estudo da viscosidade dos betumes foi utilizado um viscosímetro rotativo Brookfield, realizando-se ensaios para uma gama alargada de temperaturas, entre 120 e 170 °C e para diferentes patamares de temperatura com incrementos de 10 °C entre cada um deles.

A rigidez e o ângulo de fase dos betumes foram quantificados através de um reômetro de corte dinâmico, para diferentes patamares de temperaturas entre os 5 e os 85 °C, fazendo variar entre eles a temperatura de 10 °C.

O envelhecimento dos ligantes estudados foi simulado em laboratório, através da metodologia PAV, e o envelhecimento verificado nos betumes sujeito a este tipo de ensaio foi quantificado pela realização de ensaios de temperatura anel e bola, avaliando assim o acréscimo de temperatura dos betumes envelhecidos, relativamente à temperatura anel e bola dos betumes não sujeitos a envelhecimento.

3

FILERES PARA MISTURAS BETUMINOSAS

3.1. Introdução

As características geométricas físicas e químicas dos fileres, a quantidade deste componente na mistura betuminosa e a relação ponderal filer/betume são referidas, na literatura, como aspetos muito importantes nas propriedades finais das misturas betuminosas e no desempenho das mesmas nas camadas dos pavimentos flexíveis. Torna-se pois necessário compreender de que forma as propriedades dos fileres podem influenciar as características finais das misturas betuminosas, de modo a identificar as mais relevantes, e especificar obrigatoriedade da sua quantificação laboratorial. Só desta forma é possível estabelecer critérios de conformidade, que conduzam à adoção de materiais adequados e à rejeição de materiais que possam comprometer o desempenho final das misturas betuminosas.

Todos os fileres, quando utilizados em misturas betuminosas devem cumprir com os requisitos definidos na norma europeia EN 13043 (CEN, 2002).

A definição de filer apresentada nesta norma europeia é a seguinte:

“Filler: aggregate, most of which passes a 0,063 mm sieve, that can be added to construction materials to provide certain properties”.

Esta definição de filer coloca a necessidade de analisar uma outra definição, a de agregado. Segundo a mesma norma, agregado pode ser definido como:

“Aggregate: granular material of natural, manufactured or recycled origin used in construction”.

Associadas as duas definições o significado de filer é então:

“Filler – Granular material, of natural, manufactured or recycled origin, most of which passes a 0,063 mm sieve, that can be added to construction materials to provide certain properties”.

Conjugando as traduções das duas definições, filer e agregado, constantes na norma NP EN 13043 (IPQ, 2004), resulta a definição em português do material filer:

“Filer - Todo o material granular, de origem natural, artificial ou reciclada, cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm, que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades”.

Por outro lado, as normas americanas AASHTO M17-11 (2011) e a ASTM D242-09 (2009), possuem um âmbito mais restrito aplicando-se apenas a fileres minerais. Estas normas definem filer mineral como sendo um material mineral, finamente dividido, constituído quer por pó de pedra, pó de escória, cal hidratada, cimento hidráulico, cinzas volantes, “loess” [1] ou outro material mineral adequado.

De referir ainda que em termos de normalização americana, existem ainda normas específicas para determinados fileres, para utilização específica em misturas betuminosas.

[1] Material sedimentar constituído maioritariamente por partículas siltosas transportadas pelo vento e que existe em algumas regiões da América do Norte, Europa e Ásia.

São dois os principais objetivos da utilização do filer em misturas betuminosas:

- constituir com o betume uma mistura, designada por mástique betuminoso, com adesão e rigidez adequadas à constituição das misturas betuminosas;
- contribuir para a distribuição granulométrica da mistura de agregados.

De referir que, o filer constituinte de uma mistura betuminosa, deve ser entendido como o material constituído não só pelo filer adicionado intencionalmente aos constituintes da mistura betuminosa durante o seu processo de fabrico, mas também, todo o material mais fino proveniente dos agregados finos utilizados na mistura betuminosa, bem como o material aderente às partículas dos agregados grossos e que constituem a mistura de agregados, não tendo sido por isso eliminados pelo sistema de despoeiramento.

As características dos fileres mais importantes possíveis de quantificar através de ensaios e que afetam as propriedades dos mástiques betuminosos e das misturas betuminosas (NCHRP, 2010) são as constantes da tabela 3.1.

Tabela 3.1 Principais propriedades dos fileres (adaptado de NCHRP, 2010)

Propriedades físicas/geométricas	Propriedades químicas
Tamanho e distribuição granulométrica	Plasticidade das partículas
Massa volúmica	Atividade das partículas argilosas
Superfície específica	pH da suspensão em água
Vazios entre as partículas	Solubilidade das partículas em água
Forma, angulosidade e textura	Análise química elementar

3.2. Tipos de fileres utilizados em Portugal no fabrico de misturas betuminosas

Em Portugal são utilizados quer filer comerciais, produtos obtidos em unidades industriais próprias, quer fileres recuperados, materiais obtidos nas centrais de produção de misturas betuminosas. Os fileres comerciais mais utilizados são minerais, de origem natural, obtidos por britagem e moagem de rocha, nomeadamente a calcária. Os fileres comerciais de origem artificial, como por exemplo a cal hidráulica, o cimento Portland e a cal hidratada têm em Portugal uma utilização mais restrita principalmente no que diz respeito ao cimento e à cal hidratada.

3.2.1. Fileres recuperados em central

Nas centrais de misturas betuminosas, os agregados são secos e aquecidos no tambor secador, através de uma chama que para ser mantida ativa, necessita obviamente de ser garantida a renovação do ar dentro do tambor. Para que as partículas de menor dimensão, transportadas pela corrente ascendente do ar quente e viciado, não sejam lançadas para a atmosfera, o ar extraído do tambor secador é forçado a passar em filtros de mangas, que retêm a maior parte dessas partículas. Esse material retido no filtro constitui um filer natural ao qual habitualmente é dado o nome de filer recuperado e que têm as características geológicas aproximadas dos agregados utilizados no fabrico da mistura betuminosa. Esse filer é armazenado em silos e pode ser introduzido no fabrico da mistura betuminosa como seu componente.

Em alguns casos a central de misturas betuminosas pode ter necessidade de utilizar agregados de diferentes origens geológicas, quando por exemplo utiliza agregados calcários para a generalidade das misturas betuminosas que fabrica, mas, para produzir uma mistura betuminosa para aplicar em camada de desgaste, necessita de introduzir, na produção, agregados grossos de outra origem, mais resistente ao desgaste e menos suscetíveis ao polimento, mantendo como agregado fino o pó calcário. Neste caso, o filer recuperado será constituído por uma mistura de partículas, maioritariamente calcárias, mas apresentará também partículas com a mesma origem geológica dos agregados grossos.

Neste trabalho, foram estudados treze fileres recuperados distintos: cinco de origem calcária, referenciados de FRC 1 a FRC 5, sete de origem granítica, referenciados de FRG 1 a FRG 7 e um de origem riolítica referenciado por FRR. Todas as amostras foram recolhidas nos filtros de mangas de centrais de misturas betuminosas do tipo descontínuo.

Na tabela 3.2 são apresentadas as origens e características gerais dos fileres recuperados utilizados neste estudo.

3.2.2. Fileres comerciais naturais

Os fileres comerciais naturais resultam da britagem e moagem de rocha, sendo que em Portugal os fileres deste tipo usados em misturas betuminosas são exclusivamente de origem calcária.

Tabela 3.2 Origens e características gerais dos fileres recuperados utilizados no estudo

Fileres recuperados de origem calcária		
Referência	Produtor do agregado	Origem da amostra
FRC 1	MotaEngil (Pedreira de Tomar)	Alviobeira (Central da empresa MonteAdriano)
FRC 2	Agrepor (Pedreira de Condeixa)	Condeixa (Central da empresa MotaEngil)
FRC 3	Sofibritas (Pedreira em Pombal)	Soure (Central da empresa Cidade Virtual)
FRC 4	Pragosa (Pedreira de Alenquer)	Alenquer (Central da empresa Pragosa)
FRC 5	Lena Engenharia (Pedreira de Fátima)	Fátima (Central da empresa Lena Engenharia)
Fileres recuperados de origem granítica		
Referência	Produtor do agregado	Origem da amostra
FRG 1	MonteAdriano, pedreira de Vila do Conde	Trofa. Central da empresa MonteAdriano
FRG 2	Amândio Carvalho, pedreira de Braga	Braga. Central da empresa Amândio Carvalho
FRG 3	MotaEngil, pedreira da Capsfil em Vila Flor	Vila Flor. Central da empresa MotaEngil
FRG 4	Agrepor, pedreira Vila das Aves	Águeda. Central da empresa C.Gabriel Couto
FRG 5	MotaEngil, pedreira em Penafiel	Penafiel. Central da empresa MotaEngil
FRG 6	Bripealtos, pedreira em Évora	Reguengos de Monsaraz. Central da empresa
FRG 7	Embeiral, pedreira em Penalva do Castelo	Penalva do Castelo. Central da empresa
Filer recuperado de origem riolítica		
Referência	Produtor do agregado	Origem da amostra
FRR	MotaEngil, pedreira em Ourique	Ourique. Central da empresa MotaEngil

A maior parte dos depósitos calcários existentes em Portugal apresentam valores de carbonato de magnésio (MgCO_3) inferiores a 4%, sendo por isso designados por calcários cálcicos (CaCO_3). Na zona litoral alentejana e em Trás-os-Montes existem também alguns depósitos de calcários dolomíticos ($\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$), calcários que possuem na sua composição percentagem de carbonato de magnésio superior a 60% (Manuppella & Moreira, 1975).

Em Portugal predominam os calcários sedimentares Jurássicos, junto às Costas Ocidental e Meridional, começando em Anadia e na Mealhada, ainda no Distrito de Aveiro, e desenvolvendo-se para Sul de forma quase continua até ao Distrito de Lisboa. A Sul do Tejo encontram-se ainda maciços calcários junto à Costa Ocidental, mas de uma forma bastante isolada, apenas terminando os afloramentos na zona de Santiago do Cacém no Distrito de Setúbal. Junto à Costa Meridional este tipo de rocha desenvolve-se ao longo de todo o Distrito de Faro, constituindo a bacia sedimentar

algarvia. Existem ainda alguns afloramentos de calcários cristalinos no interior do país, nomeadamente no interior transmontano e alentejano (Manuppella et al., 1980).

A maior parte dos produtores de filer calcário natural encontram-se distribuídos numa faixa com cerca de 100 km de extensão, entre Condeixa e Alenquer. O processo de fabrico inicia-se com a extração da rocha, seguida de britagem em britadores até ser atingida um tamanho das partículas entre os 8 e os 12 mm. Após esta britagem, inicia-se um processo, esquematicamente representado na figura 3.1, que consiste na moagem do material britado em moinho de bolas. Estes equipamentos possuem sistemas de aspiração que permitem encaminhar as partículas mais finas para fora do moinho, permitindo uma maior produtividade do processo, pois de outra forma, a sua permanência iria prejudicar a eficácia do sistema de moagem. No final, o produto é homogeneizado e armazenado para ensacagem ou para a expedição a granel em camião cisterna.



Figura 3.1 Esquema de central de produção de filer comercial

Neste trabalho foram estudados cinco fileres naturais, comerciais, todos eles calcários e da região centro de Portugal. Na tabela 3.3 são apresentadas as características gerais dos produtos.

3.2.3. Fileres comerciais artificiais

Existem vários tipos de fileres artificiais com comercialização corrente em Portugal, alguns com características ligantes, como a cal, ligante aéreo, a cal hidráulica e o cimento, ligantes hidráulicos e as cinzas volantes, material pozolânico.

Tabela 3.3 Origens e características gerais dos fileres comerciais naturais utilizados no estudo

Fileres comerciais de origem calcária		
Referência	Produtor	Descrição geral da amostra indicada pelo produtor
FC 1	Eurocálcio Fátima	Referência: RC 480. Muito pouco material de dimensão superior a 0,125 mm com partículas de forma subprismático a subdiscoidal, muito angulosas a subangulosas e com superfícies rugosas.
FC 2	Eurocálcio Fátima	Referência: RC 590. Sem material de dimensão superior a 0,125 mm com partículas de forma subprismático a subdiscoidal, muito angulosas a subangulosas e com superfícies rugosas.
FC 3	Lusofel Batalha	Referência: C 100. Com cerca de 10% de material de dimensão superior a 0,125 mm e percentagem de carbonato de cálcio superior a 99%.
FC 4	ParaPedra Rio Maior	Referência: Filer A. Muito pouco material de dimensão superior a 0,125 mm.
FC 5	VAC Minerais Rio Maior	Referência: Filer comercial. Muito pouco material de dimensão superior a 0,125 mm. Produto obtido por fragmentação de rocha calcária ligeiramente margosa.

De seguida são apresentados os fileres artificiais utilizados na parte experimental deste estudo. As cinzas volantes possuem um grande valor acrescentado, não só no fabrico dos cimentos, mas também como componente do betão hidráulico. Este aspeto aleado ao facto de este tipo de filer não ser usado em Portugal fez com que as cinzas volantes não fossem seleccionadas para integrar este estudo.

3.2.3.1. Cal

O termo cal é hoje aplicado para designar os produtos obtidos da calcinação de carbonatos de cálcio ou carbonatos de cálcio e de magnésio. No primeiro caso, é utilizada a rocha calcária cálcica e, no segundo caso, a rocha utilizada é o calcário dolomítico. A cal é basicamente constituída por óxidos ou hidróxidos de cálcio ou por óxidos e hidróxidos de cálcio e de magnésio e são de dois tipos: a cal aérea que pertence ao grupo dos ligantes aéreos e a cal com propriedades hidráulicas que pertence ao grupo dos ligantes hidráulicos, onde se inclui também o cimento Portland.

A cal cálcica é obtida da rocha calcária, contendo menos do que 5 % de carbonato de magnésio, enquanto a cal dolomítica ou magnesiana é obtida de calcários, contendo entre 35 a 46 % de carbonato de magnésio.

Em Portugal a cal encontra-se especificada através apenas da norma europeia EN 459-1 (CEN, 2015), abrangendo todos os produtos e todas as aplicações no setor da construção, mas muito direcionada para a utilização dos produtos previamente misturados em água e não para a utilização como filler em misturas betuminosas. A norma prevê basicamente dois tipos de cal: cal aérea, correntemente designada apenas por cal e cal hidráulica.

Outros países, como por exemplo os Estados Unidos da América, têm várias normas para especificar os vários produtos nas suas várias utilizações no setor da construção, como é o caso da norma ASTM C1097-13 (2013).

3.2.3.1.1. Cal aérea

É nas zonas de Tomar, Leiria e Fátima que se concentram os principais produtores de cal aérea, devido às características especiais dos calcários existentes nessas zonas, especialmente no que diz respeito ao elevado teor em cálcio, obtendo-se assim um produto final capaz de satisfazer as especificações, especificamente quanto às elevadas exigências físicas e químicas.

A rocha é extraída, selecionada, britada e submetida, em fornos industriais, a uma temperatura próxima dos 1000 °C (figura 3.2). Este processo de queima é designado por calcinação obtendo-se assim a cal viva, produto quimicamente composto essencialmente por óxidos de cálcio e de magnésio e fornecida em várias granulometrias (figura 3.3).



Figura 3.2 Forno vertical utilizado na produção de cal viva
www.lhoist.com/pt_pt/transformar-pedra-em-cal-ou-cal-dolom%C3%ADtica

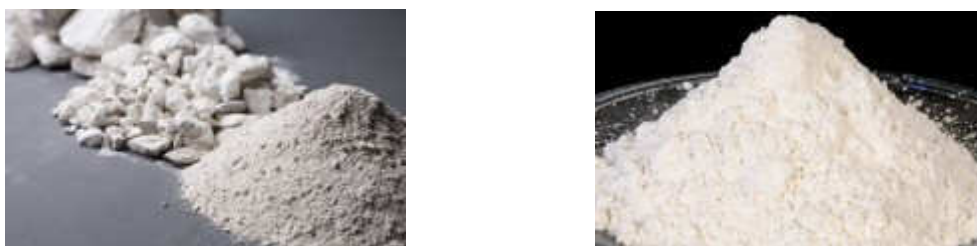


Figura 3.3 Cal viva em diferentes granulometrias
www.lhoist.com/pt_pt/refinar-cal-para-obter-produtos-finais

A cal aérea tem duas subfamílias, função da sua composição química: Cal cálcica (CL), constituída por óxidos de cálcio ou por hidróxidos de cálcio e cal dolomítica (DL), constituída por óxidos de cálcio e de magnésio ou hidróxidos de cálcio e de magnésio. Por sua vez, a cal aérea é subdividida em dois produtos bem distintos: a cal viva e a cal hidratada.

A cal viva (Q) é um ligante aéreo granulado ou em pó, e que reage exotermicamente com a água, com a qual forma uma pasta que em presença do dióxido de carbono do ar endurece, por processos de carbonatação. Este produto não é utilizado usualmente como filer em misturas betuminosas.

As expressões químicas que traduzem o processo industrial para a obtenção da cal viva são apresentadas de seguida [3.1] e [3.2].



A cal hidratada (figura 3.4) é um ligante aéreo, hidrófilo, constituído por hidróxidos de cálcio ou hidróxidos de cálcio e de magnésio, obtida por hidratação da cal viva. Usualmente, os produtores de cal viva produzem igualmente a cal hidratada, sendo o método de fabrico essencialmente constituído por um processo de decarbonatação de rocha calcária para a obtenção da cal viva, seguida de moagem e hidratação controlada do produto obtido.

As expressões químicas associadas ao processo para a obtenção da cal hidratada cálcica e cal hidratada dolomítica são indicadas em [3.3] e [3.4], respetivamente.

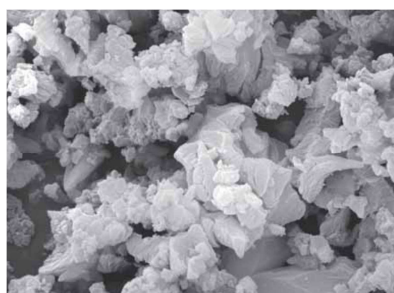
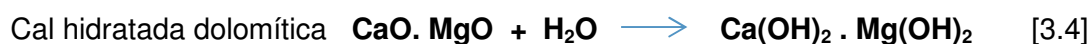
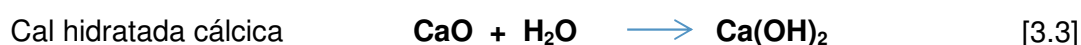
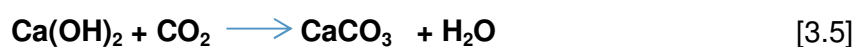


Figura 3.4 Cal hidratada vista em microscópio eletrônico de varrimento (SEM)
www.bitume.info/articlespdf/347.pdf



A cal hidratada, quando misturada com água, forma uma pasta que não ganha presa dentro de água, mas no entanto em presença do dióxido de carbono existente no ar tende a recarbonatar, obtendo-se de novo um carbonato de cálcio de elevada finura e pureza designado por carbonato de cálcio precipitado, CCP, (Queirós, 2011). Este produto não foi considerado neste estudo dado a sua fraca potencialidade de utilização como filer em misturas betuminosas, devido ao seu elevado custo. O processo de recarbonatação dos hidróxidos de cálcio pode ser explicado através das expressões químicas [3.5] e [3.6].

Carbonatação da cal hidratada cálcica:



Carbonatação da cal hidratada dolomítica:



A cal hidratada cálcica e a cal hidratada dolomítica apresentam algumas diferenças importantes. Os óxidos de cálcio (CaO) dão origem aos hidróxidos de cálcio (Ca(OH)₂) reagindo com a água de forma imediata e para temperaturas normais, enquanto que os óxidos de magnésio (MgO) requerem condições especiais de hidratação e temperatura para darem origem aos hidróxidos de magnésio (Mg(OH)₂). Se no final a cal hidratada

apresentar óxidos de magnésio não reativos, estes vão constituir como material inerte de pequenas dimensões, ou seja, como areia.

A cal viva cálcica produz uma cal hidratada contendo cerca de 72 a 74% de óxido de cálcio e 23 a 24 % de água quimicamente combinada.

A produção de cal hidratada através da utilização de uma cal viva dolomítica pode seguir dois procedimentos: à pressão atmosférica ou sob pressão, obtendo-se nos dois casos cal dolomítica hidratada, em que no primeiro processo se obtém um produto constituído por 46 a 48 % de óxidos de cálcio, 33 a 34% de óxidos de magnésio e 15 a 17% de água quimicamente combinada, e no segundo caso o produto obtido possui 40 a 42 % de óxido de cálcio, 29 a 30% de óxido de magnésio e 25 a 27% de água quimicamente combinada.

A cal hidratada obtida da hidratação da cal viva é um pó branco (cal cálcica) ou cinzento (cal dolomítica), sem odor, de valor da massa volúmica entre 2,4 e 2,8 Mg/m³, baridade entre 0,45 e 0,8 Mg/m³, apresenta a 20 °C de temperatura uma solubilidade em água cerca de 1,6 g/l, possui um pH aproximado de 12, sendo a sua composição química aproximada apresentada na tabela 3.4.

A cal hidratada pode ser comercializada em três formas distintas: pó (S), pasta (S PL) ou leite de cal (S ML).

Tabela 3.4 Composição química aproximada da cal hidratada

Componente	Percentagem
Água	0,1 – 2,5
Hidróxidos de Cálcio	90 – 95
Hidróxidos de Magnésio	0,5 – 1,0
Sílica Cristalina (Quartzo)	< 1
Dióxido de Silício	0,5 – 2
Óxido de Alumínio	0 – 2
Óxido de Ferro	0 – 0,4

As produções obtidas no processo industrial são em média as seguintes:

- ✓ são necessários cerca de 100 Mg de calcário para se obterem 56 Mg de cal viva (óxidos de cálcio);

- ✓ por sua vez esta massa de cal viva, 56 Mg, quando adicionada a 18 Mg de água permite obter cerca de 74 Mg de cal hidratada (hidróxidos de cálcio);
- ✓ para ser produzido leite de cal torna-se necessário proceder à mistura de cerca de $\frac{1}{4}$ de cal hidratada com $\frac{3}{4}$ de água.

Assim, uma unidade de cal viva corresponde a cerca de 1,32 unidades de cal hidratada, que por sua vez origina 6,6 unidades de leite de cal.

As principais indústrias e produtos em que a cal hidratada tem hoje utilização são apresentadas na tabela 3.5.

Foi nos EUA, no ano de 1910, que começou a ser utilizada a cal hidratada em misturas betuminosas, tendo começado a ser usada como um aditivo em mistura betuminosas para camada de desgaste, como forma de melhorar a resistência da mistura betuminosa ao desprendimento.

Tabela 3.5 Utilização da cal hidratada

Indústria	Produto
Celulose	Papel
Alimentar	Açúcar
Farmaceutica e Cosmética	Medicamentos e produtos de beleza
Siderurgia e Metálica	Aço, alumínio e outras ligas
Química	Soda caustica
Curtume	Transformação de peles
Agricultura	Correção de solos
Ambiente	Tratamento de águas
Construção	Tintas, tratamento solos, argamassas, produtos de reboco, misturas betuminosas

Em Portugal, por outro lado, a utilização deste produto como filer em misturas betuminosas é praticamente inexistente. Das poucas obras em que este filer foi utilizado, praticamente não existem registos de estudos e análises ao desempenho das misturas betuminosas com introdução deste filer e quase sempre a cal hidratada é utilizada de forma não intencional. Tal deve-se à necessidade de dar cumprimento a

exigências dos cadernos de encargos que obrigam à utilização de cal como filer e por algum desconhecimento e confusão que ainda existe entre os dois produtos: cal hidratada e cal hidráulica.

No entanto, em alguns países, a utilização da cal hidratada é de uso obrigatório no fabrico de determinadas misturas betuminosas, como é o caso dos EUA e Holanda (EuLA, 2011). Em alguns estados dos EUA a cal hidratada é aplicada de forma obrigatória já desde 1970 (Hicks & Scholz, 2003), existindo mesmo normalização que define as características específicas deste produto para utilização como filer em misturas betuminosas: ASTM C1097-13 (2013) e AASHTO M303-06 (2006).

Também na Holanda a utilização de cal hidratada é obrigatória em misturas betuminosas do tipo drenante, como forma de aumentar a afinidade entre o mástique betuminoso e o agregado, obtendo-se assim condições favoráveis à obtenção de misturas betuminosas mais duráveis.

West & James, em 2006, estudaram o comportamento de misturas betuminosas do tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) com diferentes tipos de fileres, tendo concluído que a utilização da cal hidratada apresenta vantagens no comportamento da mistura betuminosa.

Estudos laboratoriais realizados por Othman em 2011, para diversas misturas betuminosas, com betume borracha e cal hidratada como filer, permitiram ao autor concluir, que a utilização deste filer tem como consequência, o aumento da rigidez da mistura betuminosa e a melhoria do desempenho, em termos de propagação de fendas.

A utilização de cal hidratada conduz a vantagens significativas no desempenho das misturas betuminosas onde é incorporada (NLA, *National Lime Association*, 2001). Para além de contribuir, como qualquer outro filer, para a distribuição granulométrica das partículas sólidas e para o aumento da rigidez do mástique betuminoso e da mistura betuminosa e a consequentemente melhoria do comportamento da mistura betuminosa à formação de deformações plásticas, principalmente para temperaturas elevadas, a utilização de cal hidratada como filer apresenta as seguintes vantagens:

- ✓ melhora a tenacidade das misturas betuminosas, contribuindo assim para um aumento da resistência ao desenvolvimento de fendas por baixas temperaturas;
- ✓ melhora coesão das misturas betuminosas aplicadas em camadas de pavimentos, reduzindo assim o risco de desagregação;

- ✓ altera a estrutura química do ligante, reduzindo a sua oxidação e aumentando, assim, a vida útil do ligante e da mistura betuminosa;
- ✓ reduz a argilosidade e consequente plasticidade das partículas mais finas da mistura de agregados, melhorando a estabilidade e aumentando a durabilidade;
- ✓ aumenta a adesividade do mástique aos agregados, reduzindo o risco de desprendimento da mistura betuminosa principalmente em presença da água, reduzindo, assim, a sensibilidade à água da mistura betuminosa.

Resumidamente, e segundo a mesma publicação, a cal hidratada atua como um modificador do betume, interagindo quimicamente com o betume, principalmente a temperaturas mais elevadas e a sua utilização como filler de uma mistura betuminosa reduz o desprendimento, a formação de rodeiras, o fendilhamento e o envelhecimento da mistura betuminosa.

O desprendimento das partículas de uma mistura betuminosa acontece por diminuição da adesividade agregado mástique normalmente associada à presença de água. Alguns agregados são particularmente mais suscetíveis ao desprendimento, principalmente para situações que favorecem a redução da adesividade do agregado ao mástique, como as elevadas temperaturas ambiente, chuvas intensas, ciclos de gelo/degelo e tráfego pesado. O aumento da adesividade do mástique betuminoso a agregados aluvionares, riolíticos e dioríticos por utilização de cal hidratada foi igualmente observado por Dony *et al.*, 2012, através de ensaios realizados, segundo a norma francesa AFNOR XP T 66-043 (2006), norma entretanto anulada no ano de 2013.

Por outro lado, conforme publicação da *National Lime Association* (2003) a utilização da cal hidratada no fabrico de misturas betuminosas pode ser realizada de diferentes formas:

- ✓ por injeção no misturador das centrais do tipo descontínuo, tal como outro filler qualquer. A sua utilização por injeção direta no tambor secador/misturador das centrais contínuas é desaconselhada dada a baixa densidade da cal hidratada que iria originar a perda de grande quantidade de filler através do sistema de ventilação do tambor;
- ✓ em centrais descontínuas, adicionada previamente aos agregados num misturador próprio que realiza a homogeneização entre os agregados e a cal hidratada, sendo então a mistura transportada para o tambor secador/misturador, onde vai ser adicionado o betume;

- ✓ adicionada aos agregados húmidos com a adição de água para correção do teor em água se necessário, sendo a mistura assim obtida armazenada para maturação durante um período de pelo menos 48 h;
- ✓ em leite de cal adicionada e misturada aos agregados. A mistura assim obtida pode ser de imediato transportada para o tambor secador ou colocada em silo para maturação da mistura e posterior utilização.

A influência da forma como a cal é introduzida no processo de fabrico da mistura betuminosa foi já estudada, para agregados basálticos, em laboratório (Bock *et al.*, 2009). Os autores concluíram, através de ensaios Lottman modificado, realizados segundo o procedimento descrito nas normas AASHTO T283-03 (2003) e ASTM D4867-14 (2014) que a adição prévia da cal hidratada ao agregado grosso seco é a técnica que conduz a misturas betuminosas com melhor comportamento, no que diz respeito à suscetibilidade à água.

Outros autores estudaram o mesmo efeito em agregados calcários (Lutif *et al.*, 2008), tendo chegado a conclusões semelhantes através de ensaios com o equipamento APA (*Asphalt Pavement Analyser*). Refira-se que este equipamento resultou da evolução tecnológica de um outro modelo anterior GLWT (*Georgia Loaded Wheel Test*) e que permite em simultâneo estudar o comportamento de uma mistura às deformações permanentes e a sua suscetibilidade à água (Braham *et al.*, 2010; Cooley *et al.*, 2000).

Segundo os produtores de cal hidratada, a utilização deste produto como filer no fabrico de misturas betuminosas possui inúmeras vantagens: reduz o envelhecimento do betume da mistura betuminosa, aumentando assim o seu período de vida; aumenta a vida à fadiga da mistura betuminosa, retardando assim o aparecimento de fendilhamento por fadiga e rigidifica o mástique e, conseqüentemente, a mistura betuminosa mais do que qualquer outro filer e apenas para elevadas temperaturas, reduzindo assim o risco da formação de rodeiras no pavimento sem prejudicar o comportamento da mistura a baixas temperaturas.

A “EuLA”, “*European Lime Association*”, apresenta quatro razões para a utilização da cal hidratada no fabrico de misturas betuminosas (EuLA, 2011):

- ✓ melhora as propriedades da superfície dos agregados permitindo a formação de iões de cálcio, alterando assim não só a sua composição química, mas também a sua rugosidade;
- ✓ trata as partículas de argila eventualmente existentes na superfície dos agregados;

- ✓ reage quimicamente com os elementos mais ácidos do betume, reduzindo assim o endurecimento do ligante por envelhecimento;
- ✓ aumenta a rigidez da mistura betuminosa para elevadas temperaturas em serviço, fruto da elevada porosidade das partículas da cal hidratada.

Também outros autores resumem assim o efeito da cal hidratada quando utilizada como filer no fabrico de misturas betuminosas (Lesueur *et al.*, 2013):

- ✓ alterações ao nível da superfície dos agregados;
- ✓ floculação das argilas presentes nos agregados;
- ✓ interação química com o betume;
- ✓ interação física com o betume.

No âmbito do estudo agora apresentado, foi usado como filer uma amostra de cal hidratada, referenciada por “Chda”, proveniente da empresa Lusical de Alcanede, pertencente ao grupo Lhoist, um dos maiores produtores de cal do mundo. Trata-se de uma cal hidratada cálcica CL 90 S, com mais de 90% de hidróxidos de cálcio, designada pelo produtor como “Asphacal H”. Apresenta teores em óxido de magnésio muito baixos e uma granulometria inferior a 0,125 mm.

3.2.3.1.2. Cal hidráulica

A cal de construção com propriedades hidráulicas é um ligante constituído principalmente por hidróxidos de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. Quando misturada com água, a cal hidráulica forma uma pasta que endurece, quer por carbonatação dos óxidos de cálcio existentes no produto em presença do dióxido de carbono da atmosfera, quer por cristalização dos aluminatos e dos silicatos de cálcio.

Segundo a norma europeia EN 459-1 (CEN, 2015) existem três famílias para a cal com propriedades hidráulicas: a cal hidráulica natural (NHL), a cal formulada (FL) e a cal hidráulica (HL).

A cal hidráulica natural é fabricada em Portugal desde 1891 e é obtida através da cozedura controlada de calcário margoso, ou seja, de uma rocha calcária contendo cerca de 40 a 75% de carbonato de cálcio e 8 a 20% de argila. Com o aumento da temperatura que ocorre em fornos adequados (figura 3.5), verifica-se inicialmente a desidratação da argila a uma temperatura de cerca de 500 a 700 °C. De seguida, a uma temperatura de 850 °C, o carbonato de cálcio, ou seja, o calcário decompõem-se no

dióxido de carbono e no óxido de cálcio. A uma temperatura próxima dos 1000 °C o óxido de cálcio combina-se com a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃) resultantes da decomposição da argila, dando origem ao silicato bicálcico e ao aluminato tricálcico (Sequeira *et al.*, 2007).

A expressão química [3.7] expressa o processo de obtenção da cal hidráulica.

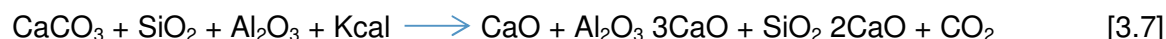


Figura 3.5 Fornos de produção de cal hidráulica
www.secilargamassas.pt/en/natural-hydraulic-lime/maceira-factory

O material assim obtido se amassado com água não ganharia presa, sendo pois necessário proceder-se de seguida à extinção da cal livre (CaO) existente, através da aspersão com água o que conduz a fenómenos exotérmicos e de expansão que levam à pulverização da cal hidráulica. Ou seja, a finura da cal hidráulica é obtida não por moagem, mas sim por pulverização que ocorre por processos exotérmicos, na hidratação da cal livre. O material fino assim obtido é formado por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxidos de cálcio, mas contém ainda partículas de calcário que foram sobreaquecidas no processo de cozedura, partículas essas muito ricas em silicatos bicálcicos, que são então separadas, moídas e novamente adicionadas. Obtém-se deste modo a cal hidráulica que apresenta propriedades intermédias entre a cal hidratada e o cimento Portland e que quando amassada com água forma uma pasta que endurece por dois processos:

- ✓ hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, fenómeno em tudo semelhante a outros ligantes hidráulicos como o cimento Portland e que corre tanto ao ar como debaixo de água;

- ✓ evaporação da água em excesso, seguida de recarbonatação dos hidróxidos de cálcio, como acontece com a cal hidratada e que acontece apenas ao ar por combinação com o dióxido de carbono.

Em resumo, poderemos concluir que tanto a cal hidratada como a cal hidráulica devem ser consideradas como fileres artificiais, quimicamente ativos e devem cumprir com os requisitos gerais da norma europeia EN 459-1 (CEN, 2015), apesar de esta norma de produto definir as exigências para estes produtos de forma muito centrada na utilização como ligantes aéreos ou hidráulicos, isto é, numa utilização com adição de água e não como uma utilização de filer, principalmente quando utilizado em misturas betuminosas.

A diferença da cal hidráulica natural (NHL) para a cal hidratada (HL) reside no facto de a cal hidratada (HL) possuir na sua composição outros constituintes pozolánicos como, cimento, escórias de alto forno, cinzas volantes, filer calcário ou outros materiais apropriados.

Existem três tipos de cal hidráulica: HL 2; HL 3,5 e HL 5, representando os números associados à sigla, o valor mínimo da resistência mecânica à compressão, aos 28 dias de idade, expressa em mega Pascal.

No estudo foi utilizada uma cal hidráulica do tipo HL 5, referenciada por “Chca”, fornecida Secil Martingança, com muito pouco material de dimensão superior a 0,125 mm, produzida na fábrica da Secil Martingança em Maceira.

3.2.3.2. Cimento Portland

O cimento Portland é um ligante hidráulico, constituído por um pó muito fino, praticamente todo passado no peneiro de 0,125 mm de abertura, usado fundamentalmente no fabrico de argamassas e betões.

O cimento Portland encontra-se regulamentado através da norma europeia EN 197-1 (CEN, 2011), onde é possível encontrar a definição deste ligante:

“Cimento é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água”.

O cimento Portland é obtido em fábricas próprias (figura 3.6), podendo o seu processo de fabrico ser descrito através dos passos seguintes:

- ✓ adição de calcário (carbonato de cálcio) com argilas ou xisto argiloso (silicatos de alumínio e de ferro) ou em alternativa adicionando margas ou calcários margosos a outros produtos ricos em sílica, alumina ou ferro;
- ✓ a mistura é então submetida a elevadas temperaturas, da ordem dos 1400 °C, em fornos rotativos, obtendo-se assim um material granular ao qual se dá o nome de clínquer;
- ✓ moagem do clínquer e adição de aditivos entre os quais o gesso como agente regulador da presa do cimento.



Figura 3.6 Fabrica de produção de cimento Portland
www.secil.pt/default.asp?pag=outao

A composição da matéria-prima para produzir o cimento deve ser ajustada, para que após a passagem pelo forno, onde perde água e dióxido de carbono, tenha aproximadamente as seguintes substâncias: CaO entre 60 a 67%; SiO₂ entre 17 a 25%; Al₂O₃ entre 3 a 8% e Fe₂O₃ entre 0,5 a 6%.

Por sua vez o clínquer é constituído por:

3 CaO.SiO ₂	Silicato tricálcico	20 - 65%
2 CaO.SiO ₂	Silicato bicálcico	10 - 55%
3 CaO.Al ₂ O ₃	Aluminato tricálcico	20 - 65%
4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Silicato tricálcico	20 - 65%

Existem vários tipos de cimento Portland: tipo I, II, III e IV (Santos, 2002). O cimento tipo I é constituído quase exclusivamente por clínquer, apenas sendo permitida a existência de outras substâncias numa percentagem inferior a 5%. Os restantes tipos dizem respeito a cimentos aditivados. Os cimentos possuem diferentes características mecânicas, prevendo a norma de produto, três classes de resistência: 32,5; 42,5 e 52,5 MPa. Estes valores dizem respeito à resistência mecânica mínima, à compressão, aos

28 dias de idade e referem-se a valores em mega Pascal. Existem ainda cimentos em que o acréscimo da resistência mecânica, nos primeiros dias de idade, acontece de forma mais rápida, cimentos “R”, e cimentos em que esse acréscimo é mais lento, cimentos “N”.

Os vários cimentos existentes são designados por uma sigla que refere o tipo, a classe e as características de endurecimento do cimento.

Neste estudo foi utilizado um cimento tipo II 32,5 N, referenciado no estudo por “Cem”, proveniente da fábrica da Secil em Outão. Trata-se pois de um cimento aditivado, que apresenta uma dosagem aproximada de 70% de clínquer e os restantes 30% de calcário moído, com uma resistência mecânica à compressão mínima aos 28 dias de idade de 32,5 MPa, a que corresponde a mais baixa classe de resistência existente, e com características de endurecimento mais lento.

3.3. Características dos fileres e metodologias de ensaio para a sua avaliação

São muitas as características dos fileres influenciadoras não só do comportamento dos mástiques betuminosos, mas também do desempenho das misturas betuminosas, podendo ser agrupadas em dois grandes grupos: características físicas/geométricas e características químicas.

3.3.1. Características físicas/geométricas

Neste ponto são apresentados os ensaios de caracterização dos fileres previstos na EN 13043 (CEN, 2002), bem como alguns outros considerados fundamentais para o perfeito conhecimento dos materiais em estudo.

3.3.1.1. Granulometria

Esta é uma característica fundamental do filer e que a norma europeia define como de avaliação obrigatória por parte do produtor, devendo os resultados ser apresentados pelo produtor. No entanto, a metodologia de ensaio prevista na sua quantificação, apenas caracteriza a granulometria acima do diâmetro de 0,063 mm, procedimento não adequado atendendo à própria definição de filer e à granulometria da maior parte dos produtos. Na realidade, é comum estes materiais apresentarem muito baixa percentagem de partículas de tamanhos superiores a 0,063 mm, pelo que a metodologia prevista não caracteriza a granulometria da maior parte do material, se não mesmo a

sua totalidade. Para o controlo da produção e mesmo para o utilizador do produto, seria recomendável a caracterização granulométrica do filer para inferiores gamas de medição do diâmetro das partículas.

O conhecimento da granulometria dos materiais granulares é importante não só para o produtor, como forma de controlar o produto, mas também para o utilizador, pois permite prever, quer algumas das restantes características do filer, quer o comportamento e desempenho do material.

Qualquer que seja a origem de um material granular, quanto menor é o tamanho das partículas, maior é a quantidade das forças que se geram entre as partículas, tornando-se menos importantes as características relacionadas com o volume das partículas, como a densidade, forma e superfície específica, e mais importante as características de superfície como a rugosidade e o atrito. No entanto, entre as partículas de pequeno diâmetro, geram-se forças que, apesar de menor valor, tornam-se relativamente importantes face ao tamanho das partículas, fazendo com que o movimento entre partículas seja muito difícil. Por este motivo, fileres de granulometria muito fina tendem a produzir aglomerados de partículas, tornando difícil eliminar essa aglomeração na suspensão do filer no betume, observando-se mástiques constituídos não por partículas individualizadas em suspensão no betume, mas sim por aglomerados de várias partículas em suspensão no betume.

A carga elétrica existente nas partículas acumula-se preferencialmente na sua superfície. O excesso de carga por unidade de massa do filer aumenta com a diminuição do diâmetro das partículas, ou seja, com o aumento da superfície específica do material. O mesmo é dizer que as forças eletrostáticas originadas tornam-se mais importantes quanto menor o diâmetro das partículas. Partículas muito pequenas, à escala do nanómetro, podem sustentar cada uma delas centenas de milhares de outras partículas dificultando o movimento entre elas.

Nas figuras 3.7 e 3.8 são apresentadas imagens obtidas em Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) do CEMUP (Centro de Estudos de Materiais da Universidade do Porto), de dois mástiques obtidos pela mistura de um betume 35/50, um com uma cal hidratada, filer com 100% partículas de dimensão inferiores a 0,063 mm e o outro com um filer calcário com cerca de 30% de partículas de dimensões superiores a 0,063 mm. O fenómeno da aglomeração de partículas é bem mais evidente no caso do mástique produzido com a cal hidratada devido à elevada finura deste filer.

O MEV, já definido anteriormente, é um equipamento (figura 3.9) capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra, muito úteis para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra.

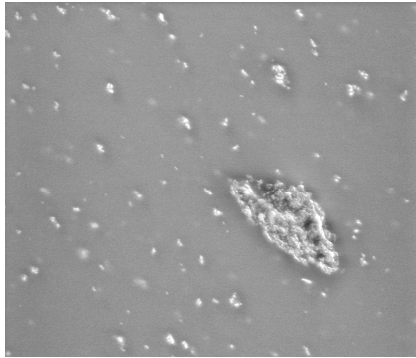


Figura 3.7 Imagem obtida por SEM de um mástique com cal hidratada



Figura 3.8 Imagem obtida por SEM de um mástique com filer calcário

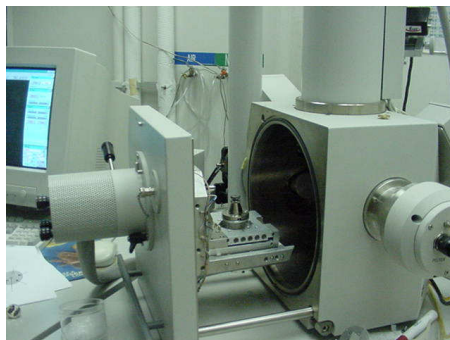


Figura 3.9 Microscópio eletrônico de varrimento (MEV)
en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope

O princípio desta tecnologia consiste na emissão de um feixe de elétrons, provenientes de uma fonte adequada, colocada no interior de uma câmara de vácuo. O equipamento permite regular a energia do feixe de elétrons, orientando-o em direção a um ponto da superfície da amostra. Ao atingir a superfície, o feixe eletrônico interage com a amostra resultando a emissão de diversos tipos de radiação e elétrons entre os quais elétrons secundários (ES) utilizados na formulação da imagem da superfície da amostra e os elétrons retrodifundidos (ER) que permitem a distinção, na superfície da amostra, de regiões de átomos leves e pesados. Os elétrons gerados pela incidência do feixe eletrônico emitido pela fonte, são rececionados por sensores estrategicamente posicionados. A energia rececionada é, então, tratada permitindo vizualizar a superfície

da amostra. Para que os elétrons não combinem com os átomos existentes no ar, a câmara onde é colocada a amostra encontra-se também em vácuo, de valor variável e regulável pelo equipamento. Existem, no entanto, amostras que não apresentam boa condutividade elétrica superficial. Para estas amostras torna-se necessário realizar um tratamento prévio que consiste, normalmente, na metalização através da aplicação de um revestimento na superfície de espessura micrométrica, com um metal de elevada pureza, normalmente ouro ou carbono (Monteiro, 2004).

Existem diversos métodos para o estudo da distribuição granulométrica dos fileres e todos eles se baseiam na análise que é realizada à amostra, a uma de três características distintas: massa, volume ou número das partículas.

Os diversos métodos de ensaio existentes, com aplicação prática para os materiais em estudo, podem ser divididos em quatro grupos: por recurso a peneiros de ensaio, por sedimentação, como resposta das partículas perante um determinado estímulo, como por exemplo por laser, e, por fim, por análise de imagem.

A avaliação do tamanho de uma partícula é realizada considerando um dos seguintes aspetos (França & Couto, 2007), representados na figura 3.10:

- ✓ esfera de diâmetro igual ao diâmetro máximo da partícula (d_{\max});
- ✓ esfera de diâmetro igual ao diâmetro mínimo da partícula (d_{\min});
- ✓ esfera de massa igual à massa da partícula (d_w);
- ✓ esfera de volume igual ao volume da partícula (d_v);
- ✓ esfera com igual superfície específica da partícula (d_s);
- ✓ esfera que passa na mesma abertura do peneiro de ensaio (d_{sieve});
- ✓ esfera de diâmetro correspondente a igual velocidade de sedimentação (d_{sed}).

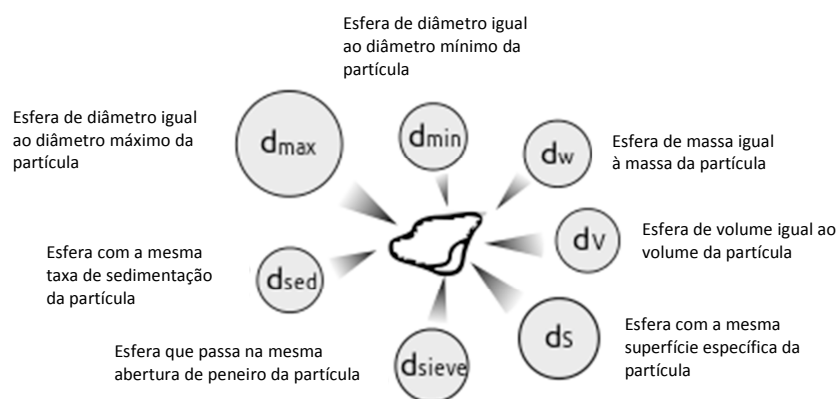


Figura 3.10 Princípios para definir o diâmetro das partículas de um filer, adaptada de Rawle, 2002

3.3.1.1.1. Processos por peneiração

Na análise granulométrica por peneiração, as partículas são separadas em frações granulométricas de acordo com os seus tamanhos. Trata-se de um método tradicional, caracterizando volumetricamente a distribuição granulométrica das partículas, que pode ser realizado por via seca ou por via húmida, em que a peneiração é feita manualmente ou com recurso a equipamentos apropriados como é o caso do jato de ar representado na figura 3.11. As normas de ensaio para avaliação da granulometria dos fileres, associadas ao método são as seguintes: AASHTO T37-07 (2007), ASTM D546-10 (2010) e EN 933-10 (CEN, 2009).

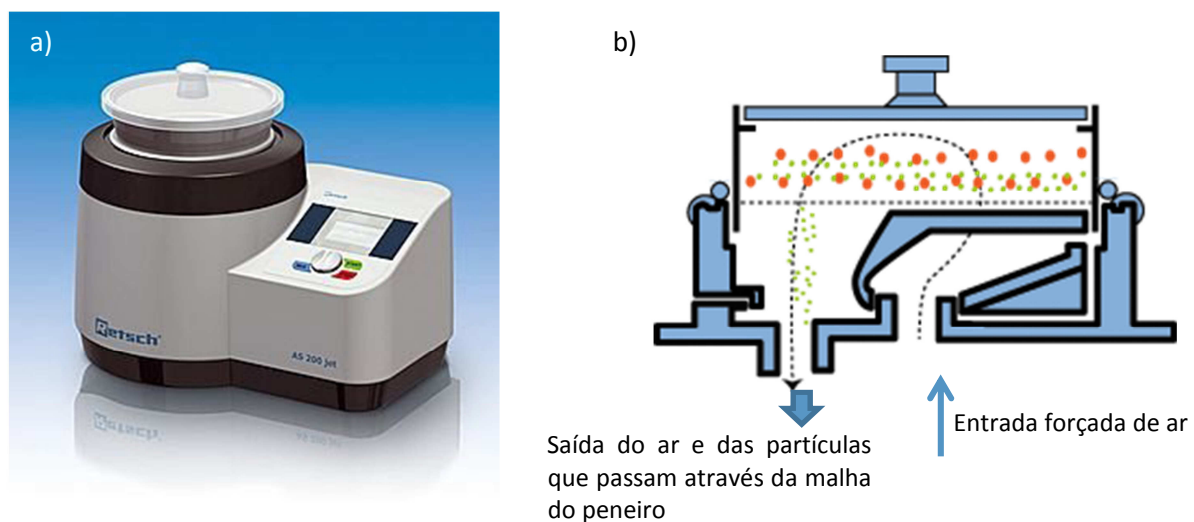


Figura 3.11 Peneiração por jato de ar: a) equipamento www.retsch.com/products/sieving/sieve-shakers/as-200-jet/function-features/
b) esquema de funcionamento www.labopolis.com/English/lab-products/Air-Jet-Machine

Trata-se de um método em que o estudo da distribuição granulométrica das partículas é obtido por separação da amostra, de acordo com a volumetria das partículas e, que quando utilizado para fileres, apresenta alguns inconvenientes tais como:

- ✓ limitação na gama de medição. Torna-se difícil construir e principalmente manter em bom estado, peneiros com abertura da malha demasiado pequena, estando previsto na norma ISO 3310-1 (2000) a dimensão de 20 μm como peneiro de menor abertura. Também a peneiração em peneiros de pequena abertura da malha é especialmente difícil, dada a facilidade com que a malha fica preenchida e devido ao atrito desenvolvido entre o arame da malha e as partículas, provocado pela agitação desenvolvida durante a peneiração. Este último aspeto conduz à aglomeração das

partículas, principalmente para os materiais mais tenso-ativos ou mesmo à sua fragmentação, para amostras mais freáveis. No entanto este inconveniente pode ser minorado, utilizando a peneiração por via húmida, podendo mesmo ser realizada uma preparação prévia da amostra, através do tratamento com um agente dispersante que facilite a individualização das partículas. A norma de ensaio de determinação do tamanho das partículas, EN 933-10 (CEN, 2009) prevê que a peneiração seja feita com peneiros em que a abertura mínima é de 63 μm , aspeto manifestamente insuficiente para a grande maioria dos fileres, dado que estes materiais apresentam elevada percentagem de partículas de dimensão inferior. Esta metodologia não permite pois conhecer a distribuição do tamanho das partículas da quase totalidade do filer;

- ✓ dificuldade em realizar a peneiração, pois facilmente a malha do peneiro fica colmatada com as partículas de diâmetro ligeiramente superior à dimensão da abertura do peneiro, aspeto que pode não ser perceptível durante a peneiração e que pode originar grandes imprecisões nos resultados;
- ✓ metodologia demorada na obtenção de resultados e com considerável ocupação de tempo de operador.

Neste estudo foram realizadas análises granulométricas por peneiração a jato de ar segundo a norma EN 933-10 (CEN, 2009), a todas as amostras de fileres. Foram ainda realizados ensaios de análise granulométrica por peneiração manual, por via seca e por via húmida, utilizando a metodologia descrita na norma europeia EN 933-1 (CEN, 2012). O objetivo destes ensaios foi o de permitir comparar os resultados obtidos por algum dos métodos, via seca ou via húmida, da peneiração manual, e avaliar se algum destes métodos conduz a resultados semelhantes aos que se obtêm por utilização do jato de ar. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no capítulo 6.

3.3.1.1.2. Processos gravimétricos

A metodologia utilizada nestes processos consiste na análise do movimento gravítico das partículas durante o processo de sedimentação num fluido. O tamanho das partículas é determinado através de uma das seguintes grandezas: velocidade de sedimentação das partículas ou variação da densidade da suspensão. A metodologia baseia-se na lei de Stokes e o diâmetro da partícula é equiparado ao diâmetro de uma esfera, constituída por um material com a mesma densidade do material da partícula e que sedimenta à mesma velocidade da partícula dentro do mesmo fluido. O estudo da

distribuição granulométrica das partículas é obtido função da massa das partículas, pelo que não é adequado para amostras em que as partículas apresentem diferentes densidades, como por exemplo misturas de fileres com densidades bem distintas ou, fileres de origem mineral constituído por diferentes minerais de diferentes densidades. O maior problema que se coloca a este método verifica-se na dispersão das partículas do filer no fluido sendo necessária, para alguns materiais, a ajuda de um agente dispersante, antifloculante e a utilização de ultrassons. A forma como é medida a concentração da dispersão ao longo do tempo pode ser realizada através de várias técnicas:

- ✓ medição direta, com a introdução de um densímetro na suspensão ou com recolha de amostras ao longo do tempo, seguida da medição da concentração de partículas nessas amostras. Esta técnica é desaconselhável por ser intrusiva, criando perturbação no processo de sedimentação;
- ✓ por meios óticos, não intrusivos, que permitem monitorizar a variação da densidade ótica da suspensão com o tempo de forma contínua;
- ✓ por absorção de raio-X (figura 3.12), método igualmente não intrusivo, que permite monitorizar em contínuo, a variação da resistência da dispersão ao atravessamento de raios-X. O método no entanto, só pode ser usado para substâncias de elevado peso atómico, pois apenas essas são opacas aos raios X (Bahia, 2011).

Estes métodos encontram-se normalizados através das seguintes normas: ISO 13317-1 (2001), ISO 13317-2 (2001), ISO 13317-3 (2001) e ISO 13317-4 (2014).

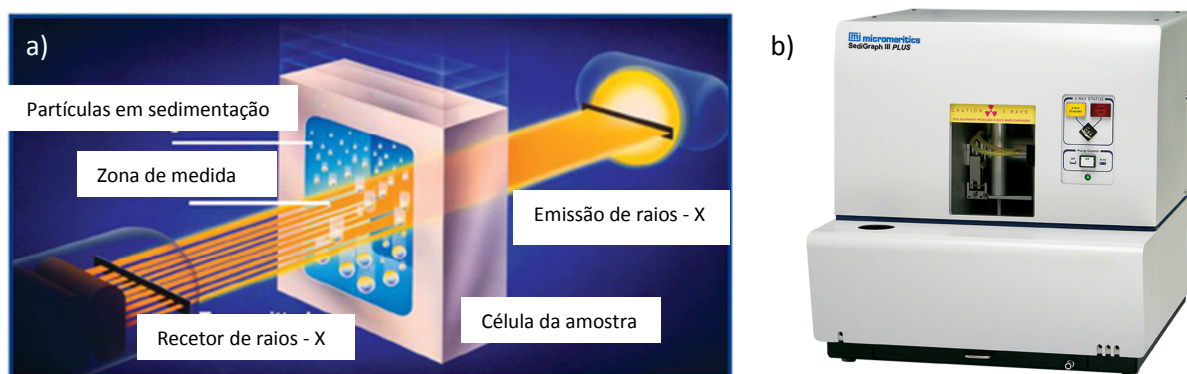


Figura 3.12 Sedimentação por raios X a) esquema do princípio de funcionamento www.micromeritics.com/Product-Showcase/SediGraph-III-Plus/SediGraph-Method-Overview.aspx
b) equipamento www.directindustry.com/prod/micromeritics/product-30867-204800.html

3.3.1.1.3. Processos por emissão de energia

Existem várias metodologias para o estudo da distribuição granulométrica, todas elas associadas ao comportamento dos materiais perante a incidência de um qualquer sistema de energia, realizando-se o estudo da resposta das partículas ou da dispersão, ao estímulo utilizado. Os principais métodos de ensaio que utilizam esta tecnologia são a difração laser e a difração dinâmica da luz “DLS - *Dynamic Light Scattering*”.

3.3.1.1.3.1. Difração laser

A difração laser é uma técnica vulgarmente utilizada para determinação da distribuição granulométrica de materiais com partículas de diâmetros entre poucas centenas de nanómetros a alguns milímetros, ou seja, precisamente na gama de tamanhos das partículas dos fileres. A metodologia do ensaio consiste em dispersar a amostra num fluido, gasoso (via seca) ou líquido (via húmida), fazendo incidir um raio laser sobre as partículas em movimento nessa dispersão. Detetores, estrategicamente posicionados, registam os ângulos de difração resultantes das discontinuidades provocadas pelas partículas dispersas no fluido, sendo depois esses ângulos correlacionados com os diâmetros das partículas, através de modelos matemáticos (figura 3.13). Resumindo, o equipamento quantifica a energia luminosa obtida pela passagem das partículas diante de um feixe luminoso e analisa essa resposta de modo a obter a distribuição granulométrica da amostra.

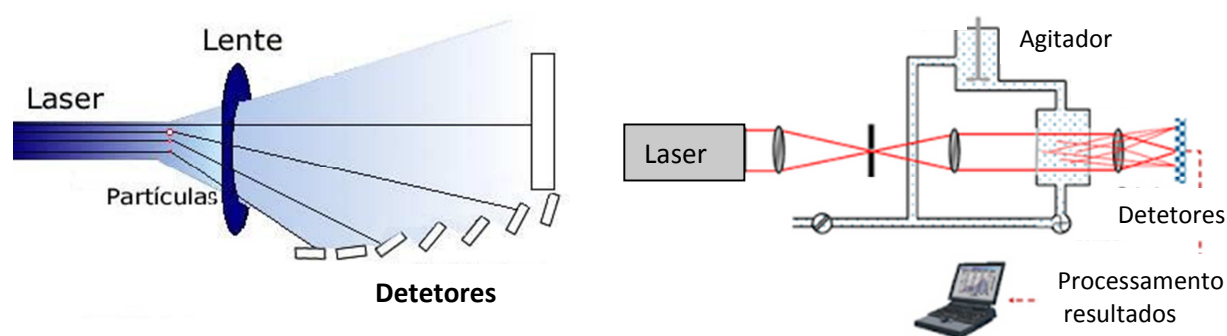


Figura 3.13 Esquema de funcionamento da difração laser a) via seca, adaptado de França & Couto (2007) b) via húmida www.quimicandovzp.com.br/2014/07/analise-microgranulometrica.html

O princípio do método baseia-se no facto de o ângulo de difração ser inversamente proporcional ao tamanho da partícula e, assim, o conhecimento deste ângulo permitir obter o diâmetro da partícula. Neste método, a partícula é considerada como esférica de

diâmetro equivalente ao diâmetro de uma circunferência de área igual à área da projeção da partícula num plano paralelo à partícula.

Ao fazer incidir um feixe laser sobre uma partícula verifica-se que uma parte da radiação irá colidir com a partícula, provocando alteração do ângulo do feixe luminoso, designada por luz difratada, mas haverá uma outra que irá atravessar a partícula, originando alteração do feixe de luz quer à entrada quer à saída da partícula, que se designa por luz refratada (figura 3.14).

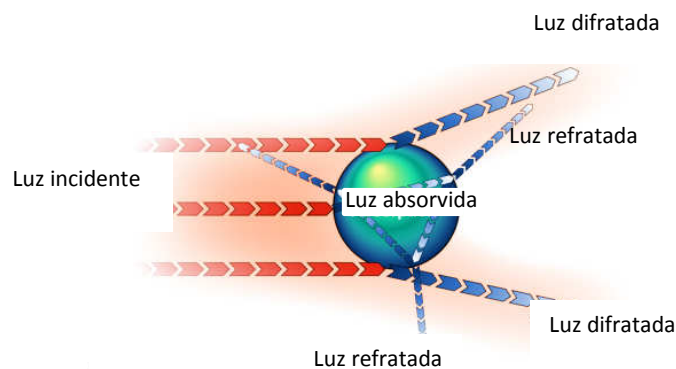


Figura 3.14 Esquema do efeito de uma luz incidente numa partícula

No primeiro caso, a luz emitida pelo emissor difrata na partícula, sendo que a amplitude do ângulo de difração depende do tamanho da mesma e da diferença entre os índices de difração principal da amostra e do material dispersante. Já, por outro lado, o resultado da luz que atravessa a partícula, luz refratada, depende da absorção da amostra à luz, ou seja, do seu índice de refração ou difração secundário.

A luz dispersa, luz difratada e luz refratada, é medida através de uma série de recetores estrategicamente posicionados, capazes de captar a luz dispersa pela presença das muitas partículas existentes na amostra.

Inicialmente, a análise realizada ao perfil de intensidade de luz dispersa baseava-se na teoria de Fraunhofer, que apenas considerava a difração da luz, não tendo em conta a perturbação no perfil provocada pela luz refratada e que por isso apresentava alguma variações importantes para as partículas de dimensão inferiores a 50 μm . Os resultados obtidos pelos equipamentos de fabrico mais atual são tratados através da teoria de Mie, que para além de se basear no princípio da esfericidade das partículas, analisa não só a luz difratada mas também a luz refratada, sendo a metodologia mais adequada quando se pretende analisar diâmetros de partículas inferiores a 50 μm . Por outro lado, quanto

menor for o ponto isotrópico, ponto abaixo do qual o perfil de intensidade não apresenta variações, conseguido pelo equipamento, menor será o diâmetro possível de quantificar. Na figura 3.15 as imagens apresentadas estão colocadas por ordem, correspondendo a primeira imagem a uma partícula de pequeno diâmetro e a mais à direita uma partícula de maior diâmetro.

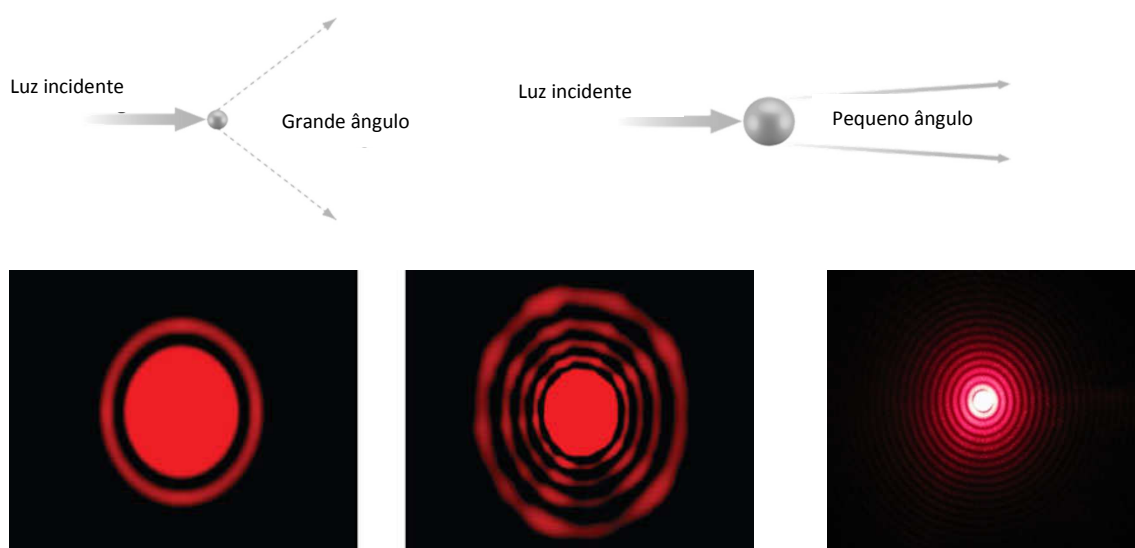


Figura 3.15 Imagens de luz difratada função do diâmetro das partículas, adaptado de Virden, 2015

Pelo que ficou dito conclui-se que, no caso dos equipamentos de fabricação mais recente, é necessário o conhecimento da absorção e do índice de refração primária da amostra, bem como do índice de refração secundária da amostra e do meio dispersante. Coloca-se aqui, desde já, um problema para fileres recuperados obtidos de misturas de agregados, fileres resultantes de rochas constituídas por minerais distintos, como por exemplo os granitos e para alguns tipos de cimento, que resultam da mistura de vários constituintes. Estes fileres ao possuírem na sua constituição vários tipos de materiais, cada um deles com valores de absorção de luz próprios, e consequentemente com propriedades óticas muito distintas, tornam difícil a adoção de um valor único de entrada no procedimento. Também as partículas muito opacas podem constituir uma das desvantagens das técnicas óticas. É possível que para este tipo de amostras, os resultados obtidos por esta metodologia possam apresentar algumas variações nas partículas de diâmetros muito pequenos ($<10\ \mu\text{m}$) que, para o caso do estudo dos fileres como material constituinte das misturas betuminosas, pode não constituir um grande problema, pois a quantidade de partículas de dimensões inferiores a $10\ \mu\text{m}$ é, na

generalidade dos casos, muito baixa. Outro tipo de problema ocorre se as partículas de filer forem muito porosas como no caso da cal hidratada.

Esta técnica pode ser considerada expedita e adequada para controlo do produto em soluções de processo, em que se pretende avaliar variações entre amostras, não sendo relevante o conhecimento em absoluto da granulometria do material. Já para os laboratórios centrais no desenvolvimento de produtos e quando é necessário fornecer valores com qualidade, a técnica deve ser executada com todos os cuidados que advêm de todas as condicionantes referidas.

As principais razões para o uso desta tecnologia, no estudo da distribuição granulométrica dos fileres, são:

- ✓ gama alargada de diâmetros, verificando-se em equipamentos mais recentes gamas de medição entre 20 nm e 3,5 mm;
- ✓ rapidez na execução dos ensaios e na obtenção dos resultados;
- ✓ repetibilidade do processo, dada a pequena intervenção por parte do operador;
- ✓ ausência de calibração, sendo aconselhável no entanto a validação dos resultados através de amostras padrão;
- ✓ técnica bem estabelecida com metodologia normalizada.

A metodologia do ensaio encontra-se normalizada através das normas ASTM D4464-15 (2015) e ISO 13320 (2009).

Muito recentemente a AAHSTO (NCHRP, 2013) propõe um procedimento normativo específico para avaliação da granulometria e da superfície específica do cimento através da difração laser.

Os ensaios podem ser realizados por via seca (figura 3.16) ou por via húmida (figura 3.17), sendo possível realizar as duas técnicas na maior parte dos equipamentos disponíveis no mercado. No primeiro caso, o meio dispersante é um gás sob pressão, geralmente ar comprimido, sendo este não só responsável pelo transporte das partículas mas funcionando igualmente como facilitador da dispersão das partículas.

Complementarmente, as partículas transportadas pelo ar comprimido antes de passarem na célula de leitura são projetadas contra um plano, facilitando assim a individualização das partículas. Deve haver todo o cuidado no valor da pressão a aplicar, pois se for muito baixo pode ser insuficiente para desaglomerar a amostra, mas se for muito elevado pode levar à fragmentação das partículas, principalmente se a amostra apresenta alguma freabilidade.

No caso da via húmida, a amostra é dispersa num fluido, geralmente em água desionizada, podendo, no entanto, ser um outro fluido, como por exemplo um álcool, no caso da amostra a ensaiar ser solúvel em água. A técnica por via húmida apresenta vantagens, pois, para além de se poder seleccionar o fluido de modo a facilitar a dispersão das partículas, é ainda possível a utilização de agentes dispersantes, facilitando a desagregação de aglomerados de partículas por diminuição da tensão superficial entre as partículas. A escolha do líquido e agente dispersante deve, pois, ter em conta vários fatores: permitir uma boa humedecimento das partículas; não permitir a ocorrência de reações entre o fluido e a amostra como por exemplo a dissolução ou aglomeração; não deve apresentar qualquer toxicidade; ser facilmente eliminado no final dos ensaios; apresentar baixo custo; ser transparente e homogéneo.



Figura 3.16 Equipamento de difração laser (por via seca e por via húmida)
www.micronscientific.com.au/analysis-technology-products/particle-size-analysis/malvern-instruments/particle-size-analysis-using-the-malvern-mastersizer-3000



Figura 3.17 Equipamento de difração laser por via húmida
www.lmsscscientific.com/products.php?prod_name=particle-size-analyser-laser-diffraction

A separação das partículas pode ainda ser facilitada por agitação da dispersão através da rotação de uma vareta e por aplicação de ultrassons. No entanto, devem ser tomadas precauções no sentido de avaliar se a energia aplicada, quer a mecânica quer a térmica, pois o aumento de temperatura devido à fricção entre as partículas, não poderá originar a fragmentação das partículas por forma a não se verificar a diminuição do seu tamanho. Deve, igualmente, haver o maior cuidado no uso da água como fluido, no caso da amostra ser um ligante hidráulico, dado que pode ficar alguma partícula retida no equipamento tornando difícil a sua remoção, após a presa do ligante, e conduzir a avarias no equipamento.

A via húmida apresenta como desvantagem a utilização de pequenas quantidades de amostra, pois a concentração das partículas na dispersão não pode ser muito elevada

de modo a que as partículas não fiquem ocultas por outras partículas. Por outro lado, a metodologia por via seca, apesar de permitir ensaiar uma maior quantidade de amostra, não deve ser utilizada para amostras tóxicas e em casos em que as partículas tenham tendência para se aglomerarem ou apresentem características de fluidez deficitárias.

Em qualquer das metodologias, outro aspeto a ter em conta, diz respeito à concentração das partículas sólidas relativamente ao fluido. Se essa concentração for elevada, a quantidade de amostra ensaiada é grande, mas aumenta o número de partículas não avaliadas, dado ficarem ocultas por outras partículas de maiores dimensões. Por outro lado, se a concentração é pequena, a amostragem pode ser insuficiente para se obter um resultado com qualidade.

Mingard *et al.*, 2009, sugerem a utilização de padrões, de modo a garantir a qualidade das medições realizadas por este tipo de equipamentos.

Neste trabalho foram realizados ensaios por via seca e por via húmida concluindo-se ser esta última técnica a mais adequada. Deve, contudo, ser sempre realizado um estudo prévio no sentido de seleccionar o tipo de dispersante e o tempo e energia de agitação para dispersão das partículas na água, bem como o estabelecimento dos parâmetros óticos.

Os programas de tratamento dos resultados obtidos permitem definir a distribuição granulométrica da amostra através da curva granulométrica e do histograma de distribuição, bem como a obtenção de diversos parâmetros granulométricos, que serão referidos neste trabalho no capítulo 6.

Mais recentemente, os fabricantes deste tipo de equipamentos disponibilizam, como acessório, um microscópio que torna possível o conhecimento não só do tamanho das partículas, mas também da sua forma. O microscópio dispõe de uma câmara, sendo as partículas conduzidas frente a um grupo ótico capaz de registar imagens que permitem concluir sobre a forma das partículas do filer.

Neste estudo foram realizadas análises granulométricas por difração laser segundo o descrito na norma ISO 13320 (2009), por via seca para os fileres com propriedades hidráulicas, ou seja para a cal hidratada, cal hidráulica e cimento Portland e por via húmida para os restantes fileres. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no capítulo 6.

3.3.1.1.3.2. Dispersão de luz dinâmica (DLS - *Dynamic Light Scattering*)

Esta metodologia encontra-se normalizada segundo a norma ISO 22412 (2008) e especifica um método para a quantificação do tamanho hidrodinâmico das partículas, sua distribuição granulométrica e estado de aglomeração, bem como o peso molecular de macromoléculas e de nano partículas. A quantificação é realizada através do estudo da dispersão de luz dinâmica feita incidir numa suspensão das partículas num fluido (figura 3.18). É um método aplicável a amostras com dimensões da ordem do nanómetro, que requer o conhecimento prévio de vários parâmetros quer da amostra quer do fluido no qual as partículas se encontram em suspensão, aspetos pelos quais o método não tem grande aplicação para o caso dos fileres. Na realidade, a maior parte dos fileres tem uma muito baixa percentagem de partículas de dimensão inferior ao micrómetro, pelo que deixa de ser interessante conhecer a granulometria de uma fração tão pequena de material.



Figura 3.18 Equipamento DLS Dynamic Light Scattering

www.malvern.com/en/products/product-range/zetasizer-range/zetasizer-microv/default.aspx

3.3.1.1.4. Processos de análise de imagens

Estes métodos consistem na captação de imagens das partículas através de câmaras, com ou sem microscopia, e posterior tratamento através de análise ótica. Esta técnica de captação e tratamento de imagem possui a grande vantagem de permitir obter, não só a distribuição granulométrica, mas também valores quanto à forma e superfície específica das partículas. Associado a este método existem duas tecnologias: imagens obtidas de forma estática (figura 3.19) e imagens obtidas com as partículas em movimento (figura 3.20).

O primeiro método de ensaio encontra-se normalizado através da norma ISO 13322-1 (2014). O método permite a obtenção de imagens das partículas que se encontram em repouso numa superfície horizontal (figura 3.21).

A ausência de movimento permite elevada resolução das imagens captadas, sendo assim possível obter melhor informação sobre a dimensão e forma das partículas principalmente as de menor diâmetro.

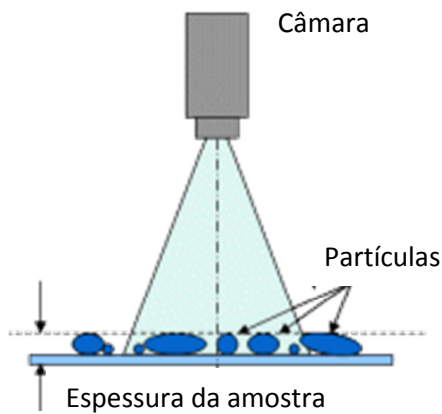


Figura 3.19 Microscopia - método estático
www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/ImageAnalysis.html

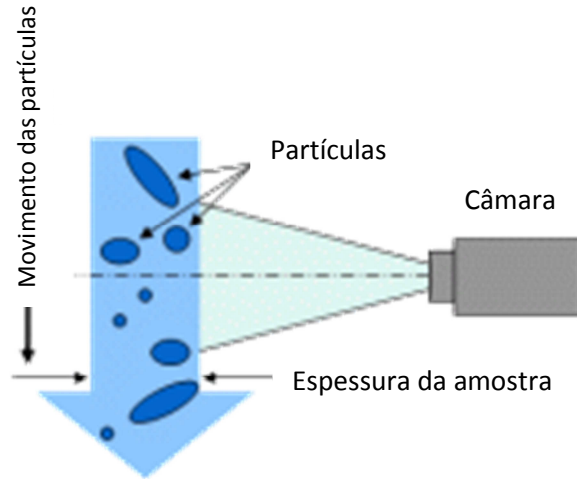


Figura 3.20 Microscopia - método dinâmico
www.sympatec.com/EN/ImageAnalysis/ImageAnalysis.html

No entanto, este método apresenta alguns inconvenientes:

- ✓ pequena quantidade de amostra ensaiada;
- ✓ as partículas ao serem colocadas em superfície horizontal tendem a estabilizar de forma preferencial segundo determinada orientação;
- ✓ coloca dificuldade acrescida no tratamento das imagens no caso das partículas se disporem em camadas, umas sobre as outras.

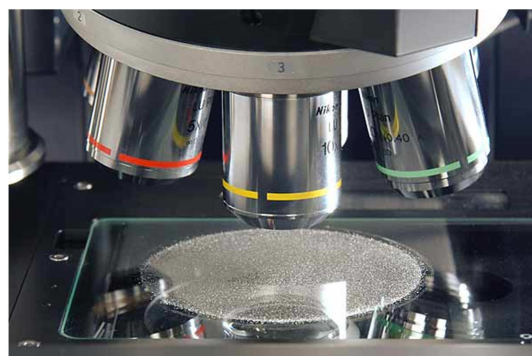


Figura 3.21 Equipamento de microscopia - método estático
www.malvern.com/en/products/product-range/morphologi-range/morphologi-g3/default.aspx

O método em que as imagens são captadas com as partículas em movimento (figura 3.22), permite ensaiar maior quantidade de amostra e as imagens são obtidas sem que as partículas estejam dispostas com orientação preferencial, mas sim de forma aleatória, reduzindo igualmente o risco de partículas mais pequenas ficarem ocultas pelas de maior diâmetro. Apresenta, no entanto, como desvantagem uma gama de medições entre os 0,03 e os 300 μm e, portanto, não totalmente adequada ao material filer. O método de ensaio encontra-se normalizado através da norma ISO 13322-2 (2006).

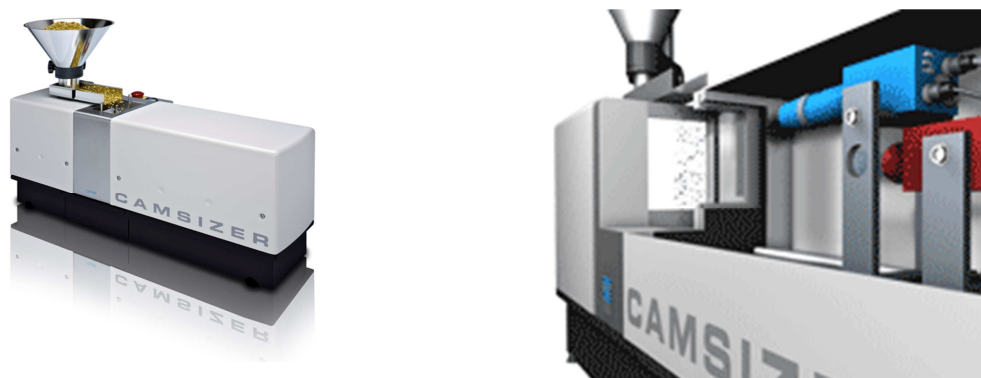


Figura 3.22 Equipamento de microscopia - método dinâmico www.retsch-technology.com/rt/products/dynamic-image-analysis/camsizer-p4/function-features/

3.3.1.2. Forma e angulosidade das partículas e textura da superfície

As características de forma e angulosidade das partículas e da textura da superfície não se encontram previstas avaliar na EN 13043 (CEN, 2002). No entanto, são características que influenciam o arranjo entre partículas fazendo variar, pois, os vazios entre as partículas do filer, a forma como o betume as envolve e o modo como este é adsorvido pelas partículas.

Muitos estudos apontam no sentido de a forma, angulosidade e textura serem propriedades das partículas que podem influenciar o comportamento do mástique betuminoso (Anderson & Goetz, 1973; Anderson & Tarris, 1982; Kandhal *et al.*, 1998; Mogawer, 1996; Ishai *et al.*, 1980 e Silva *et al.*, 2005). No entanto, não é fácil a avaliação de cada uma destas características de forma isolada e muito menos avaliar de que forma cada uma delas interfere no desempenho da mistura betuminosa.

Partículas com formas do tipo filamentos fazem aumentar a porosidade do filer, melhoram a resistência mecânica, pois como que criam barras de reforço na mistura, diminuem o brilho do mástique betuminoso, caso as partículas se projetem para fora do

mástique e, por outro lado, podem criar como que âncoras aumentando a adesividade ao agregado.

Partículas lamelares tendem a sobrepor-se e a facilitar a entrada de água enquanto que partículas arredondadas tendem a diminuir o efeito rigidificante do filer e a produzir fileres com maiores porosidades entre partículas.

Fileres de formas irregulares e angulosas aumentam a viscosidade do mástique betuminoso e o seu ponto de amolecimento, diminuindo o valor da penetração e da ductilidade (Silva, 2005).

Os vazios do filer seco compactado, ou seja, a porosidade do filer compactado, são fortemente influenciados pela forma das partículas, pois esta característica é responsável pela forma como as partículas de filer se distribuem umas com as outras. Elevada porosidade no filer seco compactado conduz a que uma parte significativa do betume utilizado na mistura betuminosa seja necessário para preencher esses espaços, conduzindo a mástiques demasiados rígidos e com pouco betume livre para revestimento da superfície do agregado da mistura betuminosa.

A quantidade de betume necessária para que o mástique possua determinada viscosidade é assim proporcional à porosidade do filer seco compactado, à superfície específica do filer e à capacidade do filer se deixar molhar pelo betume.

A forma das partículas e textura da superfície das partículas do filer influenciam a percentagem ótima em betume, o modo como as partículas se distribuem no mástique betuminoso, influenciando assim as características do mástique e das misturas betuminosas.

Também a textura da superfície é responsável pela grandeza das forças de atrito que se desenvolvem entre as partículas, influenciando a forma como se deslocam e se dispersam no betume.

Existem muitos métodos para avaliar a forma das partículas dos agregados (Masad *et al.*, 2007). Para o caso dos fileres, os métodos existentes dividem-se em indiretos, como é o caso dos vazios do filer seco compactado, e diretos por processos óticos tais como os descritos no ponto 3.3.1.1.3.3, ou acoplando equipamentos óticos aos equipamentos de difração laser. As imagens obtidas são registadas e analisadas, permitindo obter coeficientes de forma adequados ao tamanho das partículas.

Neste estudo, foram realizadas observações à superfície de alguns dos fileres estudados através de microscópio ótico e os resultados obtidos nas observações efetuadas são apresentados no capítulo 6.

3.3.1.3. Massa volúmica

A quantificação da massa volúmica do filer é obtida pelo cociente entre a massa das partículas e o seu volume, podendo o volume ser determinado experimentalmente pela quantificação do volume de líquido deslocado pelas partículas por utilização de picnómetros de vidro. Este método encontra-se normalizado pela norma europeia EN 1097-7 (CEN, 2008).

Neste estudo, foi realizada uma abordagem prévia sobre a utilização da metodologia prevista nesta norma de ensaio europeia, concluindo-se da dificuldade de utilização do método e da sua fraca repetibilidade para algumas das amostras ensaiadas, nomeadamente para os fileres recuperados. Esta dificuldade deve-se fundamentalmente ao tipo de picnómetro utilizado, de apenas 50 ml de volume. Assim, optou-se por seguir a metodologia utilizada para os ligantes hidráulicos e recomendada na norma EN 196-6 (CEN, 2010), que prevê igualmente a utilização de um picnómetro de vidro mas de maior capacidade, cerca de 250 ml e diferente, no que diz respeito à forma de definir o volume total da amostra, designado por volumínmetro Chatelier (figura 3.23). Este assunto será abordado de forma mais pormenorizada no capítulo de apresentação de resultados.

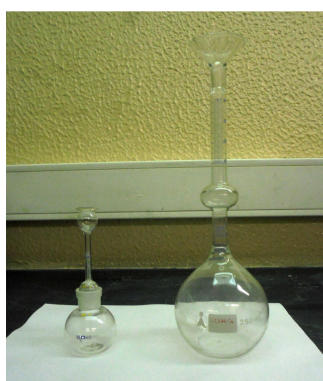


Figura 3.23 Picnómetro de 50 ml de capacidade e volumínmetro Chatelier

Existem também equipamentos de comercialização mais recente (figura 3.24), designados por picnómetro de hélio, de metodologia já normalizada através da norma americana ASTM D5550-14 (2014), em que o volume das partículas é determinado pelo

volume de gás deslocado. Esta metodologia possui a vantagem de quantificar de forma mais correta o volume real das partículas de materiais, que apresentam elevada porosidade como é o caso da cal hidratada (Bahia, 2011).

Neste estudo, foram realizados ensaios para todos os fileres estudados, de acordo com a norma europeia EN 196-6 (CEN, 2010) e os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no capítulo 6.



Figura 3.24 Picnómetro de hélio [http: www.powderhandling.com.au/articles/pycnometer---accupyc-ii-1340-for-powder-process-applications](http://www.powderhandling.com.au/articles/pycnometer---accupyc-ii-1340-for-powder-process-applications)

3.3.1.4. Massa volúmica aparente em querosene

A massa volúmica aparente ou baridade de um filer representa a massa por unidade de volume do filer não compactado e é quantificada numa suspensão do filer em querosene, dentro de uma proveta de vidro (figura 3.25), de acordo com o procedimento descrito na norma EN 1097-3 (CEN, 1998).



Figura 3.25 Ensaios de determinação da massa volúmica aparente do filer em querosene

Os ensaios realizados permitiram concluir da necessidade de alterar a metodologia de ensaio prevista na norma europeia para adaptar a fileres de baixa densidade, definindo a quantidade do provete em volume e não em massa.

O valor desta característica permite, conjuntamente com a massa volúmica e com o valor da baridade do filer seco compactado obtido no ensaio Rigden, obter uma série de características volumétricas dos materiais.

No âmbito deste trabalho foram realizados ensaios de massa volúmica aparente a todos os fileres estudados, de acordo com a norma europeia referida.

3.3.1.5. Vazios do filer seco compactado (*Rigden Voids*)

A determinação dos vazios do filer seco compactado foi desenvolvida por Rigden em 1947 (Faheem *et al.*, 2012) e é, ainda hoje, um método defendido por muitos autores como uma medição indireta das propriedades geométricas do agregado, revelando que o valor do ensaio é afetado pelas quatro características geométricas: distribuição granulométrica, forma, angulosidade das partículas e textura da superfície. O relatório 9-45 (NCHRP, 2010) refere que o valor dos vazios Rigden é também influenciado pela dimensão das partículas, aspeto que não é, contudo, consensual, dado que o volume do recipiente é suficientemente grande para não influenciar o resultado do ensaio, desde que realizado de acordo com a norma, ou seja apenas para a fração 0/0,125 mm.

O ensaio consiste em avaliar a baridade do filer seco compactado em equipamento específico (figura 3.26), para uma energia de compactação normalizada e comparar a baridade assim obtida com a massa volúmica do material. O resultado é expresso em percentagem e, quanto menor for o resultado obtido, menor será o volume de vazios deixado livre pelas partículas do filer e, portanto, menor o volume de betume necessário para o preenchimento desses vazios.



Figura 3.26 Equipamento para o ensaio dos vazios do filer seco compactado

Para muitos autores, o valor dos vazios do filer seco compactado de um filer é um bom indicador do seu poder de rigidificação do mástique, afetando igualmente a viscosidade da mistura betuminosa (Horak & Makundila, 2011; Craus *et al.*, 1978; Warden *et al.*, 1959 e Kavussi & Hicks, 1997).

O ensaio deve ser realizado de acordo com o descrito na norma EN 1097-4 (CEN, 2008).

No âmbito deste trabalho, foram realizados ensaios para todos os fileres em estudo e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 6. Também para este ensaio foi necessário corrigir a massa do provete para o caso da cal hidratada para atender à baixa densidade deste filer.

3.3.1.6. Número de betume

Esta metodologia, descrita na norma europeia EN 13179-2 (CEN, 2000), consiste na determinação da quantidade de água necessária adicionar a 100 g de filer, por forma a obter uma mistura com uma determinada consistência, avaliada pela penetração de uma agulha normalizada na amostra (figura 3.27). O resultado do ensaio permite obter uma aproximação das características geométricas do filer e porque o princípio do ensaio é idêntico ao princípio associado aos vazios do filer seco compactado, os valores obtidos são semelhantes se bem que expressos em diferentes unidades.

Enquanto que no ensaio de determinação do número de betume é avaliada a quantidade de água que preenche os vazios do filer de uma mistura filer/água compactada num recipiente de modo a não ficar ar retido, no ensaio de vazios do filer seco compactado é quantificado o ar aprisionado entre as partículas do filer compactado.



Figura 3.27 Ensaio de determinação do número de betume de um filer

No capítulo 6 deste trabalho são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados a todos os fileres em estudo.

3.3.1.7. Variação da temperatura anel e bola

O ensaio de variação da temperatura anel e bola permite avaliar o poder rigidificante de um filer, através da comparação entre a temperatura anel e bola de um mástique produzido com o filer a ensaiar e o valor da mesma característica do betume utilizado na produção do mástique (figura 3.28). O método de ensaio encontra-se descrito na norma EN 13179-1 (CEN, 2013). O procedimento de ensaio prevê a utilização de um betume 70/100, consequentemente de baixo valor temperatura anel e bola, para que seja possível, para a generalidade dos fileres, a obtenção de um valor para a temperatura anel e bola do mástique betuminoso.

Este ensaio foi realizado para todos os fileres incluídos neste estudo, sendo apresentados no capítulo 6 os valores obtidos e as considerações estabelecidas.



Figura 3.28 Ensaio de variação da temperatura anel e bola

Ensaio de variação da temperatura anel e bola realizados em 2001 por Cramer *et al.*, para mástiques betuminosos produzidos com um betume com penetração de 200 (0,1 mm), com diferentes fileres e diferentes percentagens de filer no mástique betuminoso, evidenciaram elevado efeito rigidificante da cal hidratada relativamente aos restantes fileres estudados (figura 3.29).

Estes autores propõem que o efeito rigidificante não seja quantificado pelo aumento de temperatura verificado para uma determinada relação filer betume, conforme especificado na norma europeia, mas sim avaliando a relação filer/betume para a qual se obtém um aumento da temperatura anel e bola de 20 °C. Esta metodologia apesar de ter associada a desvantagem de implicar a realização de vários ensaios, permitiria avaliar as características rigidificantes do filer, função da sua concentração no mástique betuminoso.

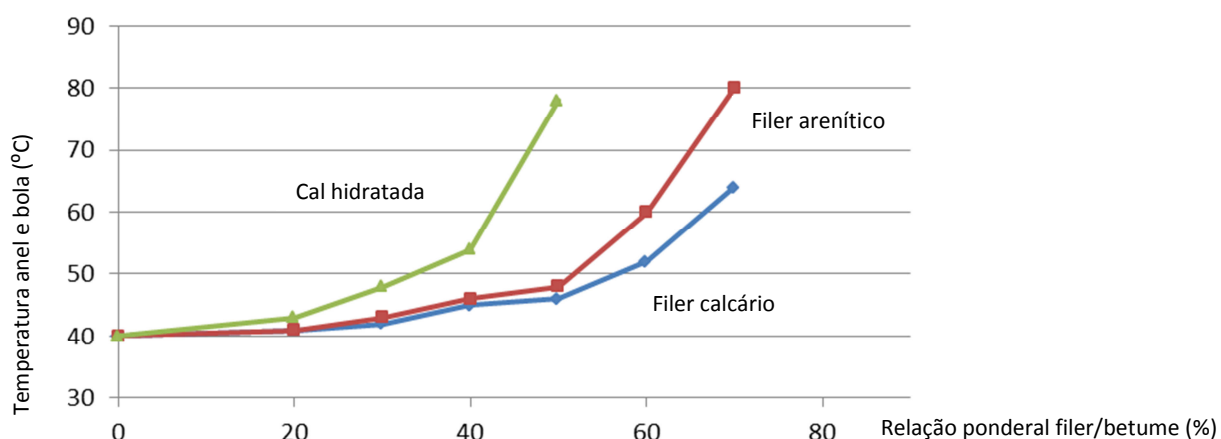


Figura 3.29 Temperatura anel e bola para diferentes mástiques com diferentes percentagens em filer, adaptado de Cramer *et al.*, 2001

3.3.1.8. Superfície específica

A superfície das partículas de um filer a aplicar em misturas betuminosas representa a superfície que separa a parte sólida (partícula do filer) da parte mais ou menos líquida, representada pelo betume pouco viscoso, durante o processo de fabrico da mistura betuminosa, ou muito viscoso, após o arrefecimento da mistura betuminosa. Assim o conhecimento do valor da área da superfície das partículas de filer é muito importante, como forma de prever o comportamento do mástique betuminoso.

A superfície específica do filer pode ser definida como a área da superfície exterior das partículas por unidade de massa e é função, principalmente, da dimensão das partículas do filer, mas também da sua forma e da angulosidade da superfície das partículas. A superfície específica varia com a dimensão das partículas, crescendo de forma quase linear com a diminuição do diâmetro das partículas. Na tabela 3.6 são apresentados valores de referência para a superfície específica de materiais granulares de massa volúmica aproximada de 2 Mg/m^3 em função do diâmetro médio das partículas.

Tabela 3.6 Valores de referência da superfície específica de materiais granulares

Diâmetro das partículas (μm)	Superfície específica (m^2/g)
1 000	0,003
10	0,3
1	3
0,001	300

O atrito é uma ação de superfície proporcional à superfície específica do material e da grandeza da força de contacto entre as duas superfícies. A grandeza da energia instalada na superfície das partículas varia com a quantidade de superfície das partículas ou seja com a sua superfície específica.

Quanto maior a superfície específica do filer, devida à finura ou irregularidade geométrica, maior será a viscosidade e o aumento da temperatura anel e bola do mástique betuminoso, sendo assim importante a quantificação desta variável.

A superfície específica da mistura de fileres é a média ponderada da superfície específica de cada um dos fileres que constituem a mistura.

O método tradicional para a quantificação desta característica do filer é o método de Blaine (figura 3.30), encontrando-se o procedimento normalizado na norma europeia EN 196-6 (CEN, 2010) e pela norma americana ASTM C204-11 (2011).

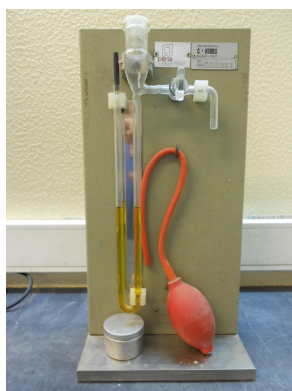


Figura 3.30 Equipamento para avaliação da superfície específica, método Blaine

No entanto, métodos óticos como os descritos no ponto 3.3.1.1.3.3, permitem igualmente a quantificação desta característica, através da análise das imagens obtidas pelos equipamentos de ensaio.

Um outro método para quantificar a superfície específica consiste em medir o volume de um gás inerte que as superfícies das partículas conseguem adsorver. Esta metodologia consegue avaliar a área da superfície das partículas, considerando as irregularidades e os poros das partículas abertos ao exterior.

Na figura 3.31 é apresentado um equipamento que permite, através do volume de gás absorvido pelas partículas, analisar a superfície das partículas de um filer, e também quantificar a superfície específica do material e a distribuição dos poros.



Figura 3.31 Equipamento de análise superficial de partículas
www.microtrac.com/belsorp-mini-ii/#.ViGbXNKrTIV

Para misturas de fileres com superfícies específicas diferentes, não se torna necessário realizar a sua quantificação, pois nenhuma das características quantificada no ensaio é alterada e assim a superfície específica da mistura é a média ponderada das superfícies específicas de cada um dos fileres utilizados na mistura.

No âmbito deste trabalho, foram realizados ensaios de determinação da superfície específica de todos os fileres em estudo, segundo o método de Blaine, sendo os resultados apresentados no capítulo 6.

3.3.1.9. Porosidade

Fileres constituídos por partículas de elevada porosidade apresentam estrutura aberta ao exterior e quando compactados dão origem a valores mais elevados da porosidade entre partículas, conduzindo assim ao aumento da quantidade de betume necessária para se obter determinada viscosidade do mástique betuminoso.

Designam-se por poros todas as aberturas, fissuras, passagens, canais, buracos, cavidades, aberturas na superfície ou no interior da partícula. Uma das técnicas para se conseguir uma elevada superfície específica é aumentar a porosidade das partículas.

Os poros de uma partícula podem ser: cegos, se possuem apenas um acesso à superfície; fechados se não possuem acesso à superfície; de transporte se não possuem acesso à superfície e apenas comunicam com outros poros e abertos se possuem mais do que um acesso à superfície.

O método mais corrente para quantificar a porosidade das partículas é o método de adsorção de gás, já apresentado em 3.3.1.3. Existem, no entanto, outros métodos para quantificar a porosidade das partículas: porómetria por mercúrio; raio X com pequeno

ângulo de espalhamento; tomografia computadorizada por raio X; exame por microscopia em amostras seccionadas e medição da permeabilidade em camada imóvel.

Neste trabalho, não foram realizados ensaios para quantificar a porosidade das partículas. De todos os fileres ensaiados apenas a cal hidratada apresenta elevada porosidade, obtida pela expansão sofrida pelas partículas a quando da sua extinção por água no processo de fabrico.

3.3.2. Comportamento e composição química

A composição química das partículas do filer tem uma importância relevante na capacidade do filer de rigidificar o betume. É muitas vezes associado aos fileres de origem mais ácida como os granitos, propriedades de rigidificação do betume mais elevadas que no caso de fileres mais básicos, como os calcários, bem como problemas, no que diz respeito à adesividade do mástique aos agregados grossos.

A adsorção do betume, por parte das partículas do filer, é tanto mais intensa quanto maior a afinidade química existente entre os dois materiais. No entanto, são as propriedades físicas da superfície do filer as responsáveis pela magnitude dessa adsorção.

A adsorção química do betume pelo filer depende essencialmente da composição química dos dois materiais em presença, observando-se uma maior adsorção no caso da cal hidratada, material fortemente básico, do que em fileres recuperados de granito, essencialmente siliciosos, ácidos e portanto hidrófitos.

Superfícies com iões OH^- são hidrofílicas enquanto superfícies com óxidos puros são parcialmente hidrofílicas e superfícies orgânicas são hidrofóbicas.

Normalmente a composição mineralógica dos fileres é referida através da percentagem de calcite e de dolomite presente na amostra (Tarrer, 1991).

Por forma a conhecer o comportamento e a composição química dos fileres, foram realizados quatro tipos de ensaios distintos.

3.3.2.1. Solubilidade em água

A metodologia seguida para quantificar a solubilidade de um filer em água encontra-se descrita na norma EN 1744-1 (CEN, 2009). Uma amostra de filer é sujeita à extração em água, sendo, no final, filtrada e avaliada a quantidade de amostra solúvel na água (figura 3.32). Esta metodologia não é aplicável a fileres com características hidráulicas,

pelo que não se aplica aos fileres como o cimento Portland, a cal hidráulica e a cal hidratada. Por outro lado, todos os restantes fileres utilizados neste estudo são de origem natural, resultantes da fragmentação de rochas sãs, pelo que não é previsível que contenham material solúvel em água.

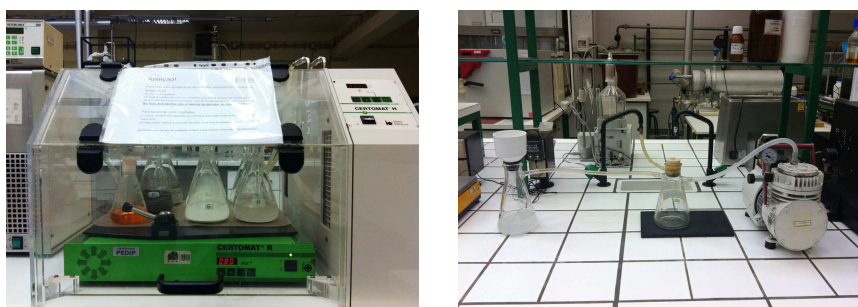


Figura 3.32 Fases do ensaio de solubilidade em água, adaptado de Santos, 2013

Por forma a confirmar esta previsão, foram realizados ensaios segundo a EN 1744-1 (CEN, 2009) para dois fileres recuperados de central, um calcário e um granítico, tendo sido obtidos valores da solubilidade em água inferiores a 0,1%. Face aos resultados obtidos, considera-se que este ensaio não é representativo de qualquer propriedade dos fileres estudados pelo que não é considerado neste trabalho.

3.3.2.2. Argilosidade

A avaliação da maior ou menor argilosidade de um filer é realizada através da determinação do valor azul-de-metileno (figura 3.33). Esta característica deve ser quantificada de acordo com o anexo A da norma EN 933-9 (CEN, 2009). A mesma característica é avaliada na normalização americana conforme previsto na norma AASHTO T330-07 (2007).

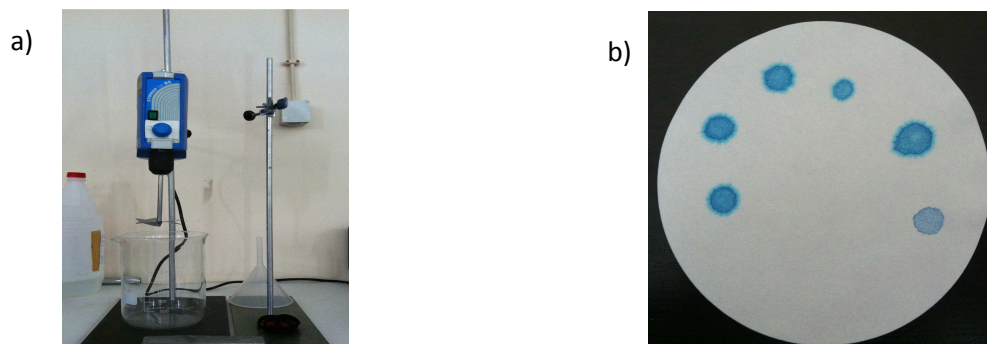


Figura 3.33 Ensaio do azul de metileno: a) equipamento b) resultado do ensaio da mancha

Este ensaio não apresenta aplicabilidade para amostras insensíveis à água, como é o caso de fileres naturais obtidos por britagem ou por britagem e moagem de rocha sã de origem granítica ou calcária. De qualquer modo, e como forma de validar esta hipótese, foram realizados ensaios sobre algumas amostras, tendo-se obtidos valores praticamente nulos, pelo que o método não é adequado para este tipo de amostras.

3.3.2.3. Determinação do pH da suspensão em água

O valor do pH de uma dispersão do filer em água é utilizado como indicador do grau de atividade do filer. Dado que não existe norma europeia para a determinação do pH para o caso dos fileres, esta característica foi quantificada para todos os fileres estudados segundo o procedimento descrito na norma ISO 787-9 (1981).

Os ensaios foram realizados para todos os fileres estudados (figura 3.34) e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 6.

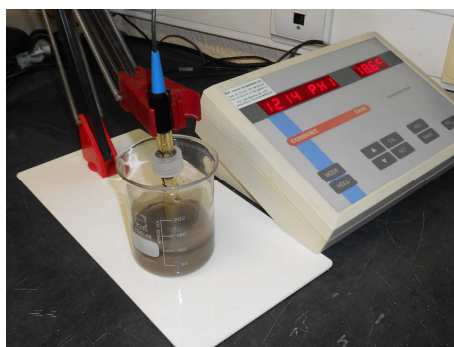


Figura 3.34 Equipamento utilizado na determinação do pH

3.3.2.4. Suscetibilidade à água

O ensaio permite determinar a suscetibilidade dos fileres à água, através da avaliação da separação do filer de um mástique betuminoso obtido a partir da mistura do filer com um betume (figura 3.35). A metodologia do ensaio encontra-se descrita na norma de ensaio EN 1744-4 (CEN, 2005). O resultado do ensaio representa a relação, expressa em percentagem, da massa do filer que a água consegue remover do mástique betuminoso, relativamente à massa inicial do filer utilizado no ensaio.

Foram realizados alguns ensaios, procurando inicialmente validar esta metodologia para um pequeno número de fileres, por se entender que face à origem das amostras não seriam suscetíveis de apresentar suscetibilidade à água.

Os valores obtidos nos ensaios bem como alguns comentários são apresentados no capítulo 6.



Figura 3.35 Fases do ensaio de suscetibilidade à água

3.3.2.5. Avaliação dos elementos químicos presentes

A avaliação dos elementos químicos presentes nos diferentes fileres foi realizada através de espectrometria de fluorescência de raios X. Esta metodologia encontra-se normalizada através da norma americana ASTM D5381-14 (2014).

A técnica consiste na emissão de uma radiação de raio X que vai conseguir retirar um eletrão de uma das camadas eletrónicas mais internas. Para manter o equilíbrio um outro eletrão de uma camada mais externa vai tomar o lugar do eletrão removido, libertando-se assim uma energia que corresponde à diferença energética entre os dois níveis eletrónicos envolvidos no processo. Nesta técnica, os raios X não penetram a amostra como no caso da técnica utilizada na medicina das radiografias por raio X.

Cada elemento químico vai dar uma resposta diferente, ou seja, a posição do eletrão que vai realizar essa troca é uma característica dos elementos químicos e é baseada nesta propriedade que esta técnica permite identificar os elementos químicos em presença. Por outro lado, a intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à concentração do elemento químico presente pelo que é também possível obter indicações com as quais se podem obter níveis quantitativos desses elementos na amostra (Costa, 2011).

O equipamento baseia-se então num emissor de raio X, num sistema ótico que permite definir com exatidão a zona da amostra que se pretende ensaiar, filtros, alvos e detetores para rececionar a resposta da amostra. A metodologia fica completa com um sofisticado programa de cálculo automático que permite interpretar a energia despendida na troca eletrónica.

Nas figuras 3.36 e 3.37 são apresentados respetivamente pormenores da preparação de provetes e o equipamento utilizado nos ensaios realizados, que por ser portátil não dispõem de microscópio que permita pormenorizar a zona da amostra a ensaiar.



Figura 3.36 Preparação de provetes para ensaios XFR



Figura 3.37 Equipamento utilizado nos ensaios XFR

3.4. Conclusões do capítulo

Os assuntos abordados, neste capítulo, têm como finalidade principal, dar a conhecer os fileres estudados na parte experimental do trabalho e apresentar as metodologias de ensaio utilizadas na caracterização das amostras.

Assim, ao longo do capítulo, foram identificados os fileres utilizados no trabalho e os processos industriais associados a cada tipo de filer, apresentando-se também todas as metodologias associadas à caracterização física e química dos produtos, com particular ênfase aos métodos utilizados no trabalho, necessárias avaliar de forma a prever o comportamento do filer na mistura betuminosa.

Algumas questões abordadas neste capítulo podem desde já ser salientadas:

- ✓ a necessidade de considerar, em termos de normalização europeia de ensaios, o estudo granulométrico dos fileres, através de métodos para além do existente. Pelas características dos fileres e perante as tecnologias existentes no mercado, a metodologia por difração laser parece ser a mais adequada;
- ✓ a necessidade sentida experimentalmente, em alterar algumas normas europeias de ensaio, tornando as normas exequíveis para todos os tipos fileres, independentemente das suas características. A título de exemplo, refira-se a quantidade do provete que de forma quase sistemática é fixada em massa, não atendendo assim às diferentes densidades registadas para os diversos fileres existentes;

- ✓ prever uma metodologia europeia para avaliação da forma e angulosidade das partículas bem como da textura superficial das partículas para uma completa caracterização geométrica das partículas do filer;
- ✓ definir um método alternativo para a quantificação da massa volúmica do filer para atender à especificidade de alguns produtos.

Na tabela 3.7 são apresentadas, de forma resumida, as características que podem ser quantificadas através de ensaios laboratoriais, bem como as metodologias associadas mais adequadas, tendo em conta as características dos fileres usualmente utilizados no fabrico de misturas betuminosas.

Tabela 3.7 Características dos fileres e metodologias associadas para a sua quantificação

Característica	Metodologia de ensaio	Normalização associada
Dimensão das partículas	Peneiração	EN 933-10
	Difração laser	ISO 13320
Forma das partículas e textura da superfície	SEM, Microscópio eletrónico de varrimento	ISO 13322-1
	Análise imagem	
Massa volúmica	Método picnómetro	EN 196-6
Massa volúmica aparente	Quantificação do volume em querosene	EN 1097-3
Vazios do filer compactado	Metodologia Rigden	EN 1097-4
Poder rigidificante do filer	Número de betume	EN 13179-2
	Variação da temperatura anel e bola	EN 13179-1
Superfície específica	Método de Blaine	EN 196-6
Porosidade das partículas	Adsorção de gás	ISO 15901-2
Composição química	Solubilidade em água	EN 1744-1
	Argilosidade	EN 933-9
	pH	ISO 787-9
	Suscetibilidade à água	EN 1744-4
	Avaliação elementos químicos	ASTM D5381

Refira-se por fim que em Portugal os fileres recuperados em central não são sujeitos a marcação CE, sendo no entanto utilizados como matéria prima sem qualquer caracterização e controlo. Este aspeto não parece no entanto ser o mais correto, uma

vez que as propriedades dos fileres condicionam as características finais das misturas betuminosas onde são incorporados.

Este aspeto, faz com que algumas entidades com responsabilidades na elaboração de cadernos de encargos em Portugal proibam a utilização de fileres recuperados, opção que no entanto também não parece a mais correta, uma vez que este procedimento pode conduzir à rejeição de materiais com propriedades adequadas ao fabrico de misturas betuminosas.

4

MÁSTIQUES BETUMINOSOS

4.1. Introdução

O termo mástique betuminoso, tal como definido na norma EN 13108-6 (CEN, 2006), para o produto “mastic asphalt”, é uma mistura betuminosa sem vazios, com betume como ligante, na qual os vazios da mistura de agregados são totalmente preenchidos pela mistura de betume e filer.

No presente trabalho, o mástique betuminoso que se pretende caracterizar não é um produto final, mas sim o conjunto fíler/betume constituinte de uma mistura betuminosa.

Dado que um mástique betuminoso não representa por si só um produto para aplicação final em pavimentação, e porque o betume e o filer, componentes do mástique, foram já apresentados neste trabalho, são abordadas neste capítulo apenas as propriedades daquele produto, consideradas potencialmente mais intervenientes no comportamento das misturas betuminosas, tais como a adesão e a coesão. Outras propriedades como o envelhecimento, a viscosidade e a reologia dos mástiques betuminosos, apesar de influenciarem o desempenho das misturas betuminosas, não serão abordadas neste capítulo dado terem sido já apresentadas no capítulo 2, dedicado aos betumes.

Os termos dispersão e suspensão são vulgarmente usados de forma indiferenciada, para descrever um sistema bifásico, referindo-se no primeiro caso que a fase sólida se encontra dispersa num fluido contínuo, e, no segundo caso, que as partículas se encontram suspensas num fluido. Quimicamente, o termo dispersão sugere que as partículas sólidas são mantidas no fluido, separadas umas das outras, por forças de corte e/ou forças interpartículas do tipo repulsivas. Porém, quando as forças atrativas são de elevada magnitude, as partículas tendem a agregarem-se ou flocularem em vez de se dispersarem, devendo usar-se neste caso o termo suspensão. No caso das suspensões, e pela mesma razão, não devem as partículas sólidas ser designadas por fase dispersa, mas sim por fase discreta. Porque da mistura do filer com o betume não se obtém a total dispersão do filer, os mástiques betuminosos devem ser considerados como suspensões de um sistema bifásico em que a fase continua (betume) e a fase discreta (filer) coexistem num mesmo volume (Genovese, 2012).

A definição do diâmetro das maiores partículas a considerar para o filer no mástique betuminoso não é consensual, havendo mesmo trabalhos em que no mástique são consideradas todas as partículas de diâmetro inferior a 2 mm. Neste trabalho, no entanto, foi considerado, como mástique, a suspensão no betume de partículas de diâmetro inferior a 125 μm , dado que esta é a dimensão correspondente ao diâmetro das maiores partículas (D) do filer definido na norma de produto EN 13043 (CEN, 2002) e, porque é praticamente impossível, com os equipamentos disponíveis, o estudo da reologia de suspensões em que na fase discreta ocorrem partículas de diâmetro superior a 100 μm (Genovese, 2012).

Numa mistura betuminosa o mástique betuminoso é responsável pelo envolvimento dos agregados, garantindo coesão à mistura enquanto esta apresenta baixa viscosidade e assegura o preenchimento dos vazios deixados pelo esqueleto mineral da mistura betuminosa compactada. O mástique betuminoso contribui, assim, para a compacidade e impermeabilidade das misturas betuminosas densas após a sua aplicação na camada do pavimento.

Hoje, é comumente aceite que as propriedades do mástique betuminoso são mais importantes do que as propriedades do betume, no que diz respeito às características finais das misturas betuminosas, nomeadamente ao nível do seu desempenho e durabilidade (Kandal, *et al.*, 1998). No entanto, a caracterização laboratorial dos mástiques deve ser considerada com algumas reservas, uma vez que estes, quando produzidos em laboratório, podem não ser suficientemente representativos dos materiais obtidos nas centrais de produção das misturas betuminosas.

O primeiro trabalho de pesquisa, realizado para estudar o comportamento dos mástiques betuminosos, foi, provavelmente, desenvolvido por Richardson em 1912. Já nessa altura, o autor concluiu que no mástique existem fenómenos físico-químicos muito para além da ação de preenchimento dos vazios do filer por parte do betume.

Os betumes são produtos hidrocarbonados constituídos por asfaltenos, insolúveis em heptano, fortemente polares, de elevada massa molecular e por maltenos, solúveis em heptano, não polares e de baixa massa molecular. Com o aumento da temperatura, a distribuição molecular altera-se, conseguindo-se assim uma diminuição da sua viscosidade. A facilidade com que as moléculas se redistribuem perante um qualquer estímulo exterior, como por exemplo a temperatura, faz crer que, quando se adiciona filer a um betume, se comecem por verificar fenómenos de adsorção, que evoluem para uma orientação molecular no seio do betume, que conduz a uma nova estrutura molecular no mástique betuminoso.

Betumes de elevada viscosidade apresentam maior concentração de componentes polares originando, um melhor contacto entre o betume e o agregado, concluindo-se, assim, que este tipo de betumes apresentam maior resistência ao deslocamento em presença da água do que betumes menos viscosos (Moraes & Velasquez, 2010).

Poder-se-á então, também, dizer que face à alteração da orientação molecular do betume verificada com a introdução do filer, a adesão depende igualmente do tipo de filer utilizado na composição da mistura betuminosa.

A maior parte dos problemas de adesão, associados ao desprendimento da mistura betuminosa da camada de desgaste, ocorre com a utilização de agregados de natureza siliciosa, eletronegativos, com carácter ácido, que, no entanto, são vulgarmente utilizados, principalmente nas camadas de desgaste dos pavimentos, devido ao bom comportamento ao polimento deste tipo de agregados. É comum considerar-se que o betume apresenta maior afinidade a agregados calcários, vulgarmente considerados de carácter básico, do que a agregados graníticos, de carácter ácido (Judele, 2011). No entanto, a existência de muitos pavimentos constituídos por misturas betuminosas com agregados graníticos sem qualquer problema de desprendimentos e outros com agregados de outras origens geológicas, como os calcários em que se verifica este tipo de patologia, pode levar a concluir que nem só a origem geológica do agregado é responsável pela perda de afinidade em presença da água, havendo com certeza outros fatores importantes na ocorrência deste fenómeno. A maior ou menor adesividade observada entre o agregado e o mástique betuminoso, depende não só dos agregados,

mas também, entre outros fatores, da viscosidade e composição química do betume, verificando-se que um mesmo agregado pode apresentar boa adesão a um determinado ligante e má adesão a um outro betume de diferente origem (Herrero *et al.*, 2009). Betumes que apresentam maior viscosidade estão geralmente associados a maiores concentrações de asfaltenos, que, por serem polares, se orientam no sentido da superfície do agregado, obtendo-se desta forma maiores forças adesivas. Assim, misturas betuminosas constituídas por betumes menos viscosos são normalmente mais suscetíveis à água.

Questões relacionadas com a perda de adesão do mástique betuminoso aos agregados grossos (figura 4.1) são muitas vezes reportadas como a causa principal para a ruína prematura de um pavimento.



Figura 4.1 Fenómenos associados à perda de coesão das misturas betuminosas, adaptado de McCann & Sebaaly, 2001

4.2. Adesão e coesão

4.2.1. Conceito de adesão e coesão

O termo adesão deriva do latim da palavra “adhaerere” e significa “colar a”. O significado geral desta propriedade deve ser entendido, segundo Chang 2008, como a atração entre moléculas diferentes. Designação semelhante pode ser encontrado na norma americana ASTM D907-12 (2012): estado em que duas superfícies, de um mesmo material ou de materiais distintos, se encontram unidas uma à outra através de forças intermoleculares ou forças de interligação ou ambas.

No contexto em estudo, ou seja, nas misturas betuminosas, o termo adesão pode ser definido como a atração observada entre o agregado (substrato) e o mástique betuminoso (adesivo), fruto de interligações mecânicas e/ou forças intermoleculares que

se desenvolvem na interface de contacto entre os dois materiais. Dito por outras palavras, adesão representa a capacidade apresentada por um ligante de revestir a superfície do agregado e permanecer aderente ao longo do tempo, mesmo em presença da água.

O termo adesividade, por outro lado, deve ser usado para significar a avaliação qualitativa da medição da adesão, ou seja, refere-se à quantidade de energia necessária para romper a ligação adesiva entre o agregado e o mástique betuminoso.

O conceito associado ao termo coesão é bem distinto dos anteriores e deve ser entendido segundo Chang 2008, como a atração intermolecular entre moléculas semelhantes, ou seja, a interação que se desenvolve entre as moléculas dentro do mesmo material. Este tipo de forças encontra-se presente em quase todos os materiais.

A coesão é uma propriedade mais simples de compreender e avaliar, pois depende apenas de um material, enquanto que a adesão depende dos dois materiais em presença e da forma como o contacto é estabelecido.

O termo adesão, fundamental ou verdadeira, diz respeito às forças entre as moléculas da interface entre os dois materiais aderidos, sendo o termo adesão prática utilizado para descrever os resultados dos ensaios que provocam a rotura da adesão, tais como os ensaios de tração do tipo “*pull-off*” (Hefer & Little, 2005).

A adesão do sistema agregado/mástique betuminoso é uma característica de grande complexidade, relacionada com a maior ou menor capacidade do mástique se ligar ao agregado e manter-se ligado em condições de serviço, mesmo em presença da água e, como referido anteriormente, depende das características dos materiais em presença, ou seja, agregados, ligante e filler, e da forma como se dá o contacto entre eles.

Durante o processo de fabrico de uma mistura betuminosa a quente, o mástique betuminoso adere à superfície do agregado. Esta adesão depende fundamentalmente das características físicas e químicas dos dois componentes, pois as ligações de atração que se criam, favorecem os elementos mais polarizados do betume, como que fracionando o betume, mantendo-se mais afastados da interface agregado/mástique betuminoso, os constituintes menos polares do ligante.

A adequada adesão entre o mástique e os agregados só ocorre se ambos os materiais apresentarem elevada adesividade, observando-se a rotura adesiva quando se verifica o destacamento do mástique betuminoso da superfície dos agregados.

Geralmente considera-se que agregados com superfícies mais rugosas apresentam maior adesividade ao betume, mas, por outro lado, superfícies demasiado rugosas, apesar de possuírem maior capacidade para fixar o betume, podem dificultar o contacto do betume à superfície do agregado.

A grandeza das forças de uma ligação adesiva dependem das características físicas e químicas dos materiais em presença na mistura betuminosa, nomeadamente agregados e mástique betuminoso, tais como: composição química dos agregados, betume, filer e mástique betuminoso; mineralogia e características superficiais dos agregados e filer; composição da mistura betuminosa, nomeadamente da dosagem de filer na mistura e da relação volumétrica entre o filer e o betume.

A resistência mecânica de uma mistura betuminosa deve-se a três fatores: empacotamento entre as partículas de agregado; atrito entre as partículas e grandeza das forças de adesão que se estabelecem entre o mástique betuminoso e as partículas do agregado grosso, sendo este último fator o mais preponderante, na generalidade dos casos. Na realidade, quando se verifica o aparecimento das primeiras fendas, observa-se quase sempre que estas têm origem por rotura adesiva e não por rotura coesiva no agregado ou no mástique betuminoso. Torna-se, assim, fundamental a otimização da adesão entre o mástique e o agregado, como forma de garantir uma elevada estabilidade da mistura betuminosa e, conseqüentemente, uma elevada resistência e durabilidade. No caso de se verificar uma fraca adesão, fica potenciado o risco de ocorrer uma rotura adesiva, prematura, na interface agregado/mástique betuminoso.

A adesão entre o mástique betuminoso e os agregados é uma propriedade que deve estar presente nos dois materiais e é caracterizada por dois fatores:

- capacidade de se estabelecer um contacto efetivo entre a superfície do agregado e o mástique betuminoso;
- resistência que se deve estabelecer para que a água não interrompa esse contacto, impedindo que a água desprenda o mástique da superfície do agregado, facto que a ocorrer, estabeleceria um novo contacto, mas agora entre a superfície do agregado e a água.

Assim, a adesão que se estabelece entre o mástique e o agregado envolve duas etapas indispensáveis para garantir adequada durabilidade da mistura betuminosa: contacto e resistência ao desprendimento.

A primeira etapa, designada por contacto ou adesão passiva, consiste em garantir o contacto entre o mástique e o agregado, ou seja, promover a molhabilidade da

superfície do agregado pelo mástique betuminoso. Para que se verifique um contacto efetivo entre o mástique e a superfície do agregado é necessário que ocorra uma boa molhagem da superfície do agregado pelo mástique. Esta etapa acontece, fundamentalmente, durante a amassadura dos diferentes componentes da mistura betuminosa, podendo no entanto ser promovida durante as operações de compactação da mistura betuminosa na execução da camada.

O envolvimento dos agregados pelo mástique, necessário à ocorrência do contacto entre os dois materiais, pode ser dificultado pela elevada viscosidade do mástique betuminoso e pela baixa afinidade química que o mástique apresenta à superfície de alguns tipos de agregados. Esse envolvimento pode ser, desde logo, promovido sem alteração da formulação da mistura betuminosa, através do aumento da energia de compactação ou do tempo de amassadura da mistura betuminosa. Este último aspeto, deve, no entanto, ser ponderado, pois contribui para o agravamento do envelhecimento do betume.

A adição ao betume de polímeros ou fibras, ou o uso de determinados fileres, aumenta a viscosidade do mástique, dificultando, ainda mais, o contacto do mástique ao agregado, devendo, pois, ser colocada atenção redobrada nestas situações. Agregados angulosos, porosos, com superfícies de elevada rugosidade, com pó aderente ou húmidas, torna o contacto com o mástique ainda mais difícil. Os agregados numa mistura betuminosa podem aparentemente apresentarem-se bem envolvidos pelo mástique, mas a presença de pó ou água na superfície dos agregados pode impedir o contacto entre os dois materiais e, portanto, não estar garantido uma das etapas essenciais para ocorrer a adesão. Para que o mástique consiga molhar convenientemente a superfície dos agregados, devem ser estabelecidos alguns requisitos:

- definir parâmetros adequados para as características do filer;
- tempo mínimo para a amassadura dos constituintes da mistura betuminosa;
- temperatura adequada dos agregados e do ligante no momento do contacto dos dois materiais;
- viscosidade adequada do mástique betuminoso no momento da amassadura.

O princípio para promover o contacto entre o betume e a superfície dos agregados centra-se em tornar a superfície do agregado mais recetiva ao betume. Uma das

soluções possíveis consiste em modificar o betume com a adição de agentes que promovam esse contacto.

A segunda etapa, designada por resistência ao desprendimento ou adesão ativa, consiste em manter o contacto estabelecido entre o mástique e a superfície dos agregados, garantindo a resistência ao desprendimento, devendo esse contacto efetivo ser garantido durante a vida útil prevista para a camada do pavimento. Agregados arredondados e com superfícies polidas apresentam maiores dificuldades em manter o contacto entre o betume e a sua superfície.

O desprendimento ocorre, quase inevitavelmente, devido à rotura frágil do mástique na interface com o agregado, que se verifica pelo aumento da rigidez do betume consequência do seu envelhecimento. No entanto, o desprendimento do betume pode ocorrer de forma prematura devido ao aparecimento de água entre a superfície do agregado e o filme do betume que a reveste (Ribeiro, 1995). A água ao apresentar maior afinidade ao agregado que o betume consegue facilmente descolar o betume da superfície do agregado e colocar-se na interface dos dois materiais. Assim, por forma a aumentar a vida de uma mistura betuminosa, devem ser consideradas duas preocupações:

- evitar a ocorrência de água na interface dos dois materiais;
- diminuir a sensibilidade à água da uma mistura betuminosa pela utilização de produtos promotores da adesão, uso de betumes modificados ou de determinados tipos de fileres.

Se por um lado a utilização de betumes modificados, fileres que promovem a rigidificação do mástique e agregados porosos, angulosos e com superfícies com elevada microrrugosidade, torna as misturas betuminosas menos sensíveis à água, por outro lado, dificulta o contacto do ligante com a superfície do agregado que, como referido, terá de ocorrer para garantir a adesão entre os dois materiais. A utilização de betumes de baixa rigidez, fileres de menor efeito rigidificante e agregados arredondados de fraca microrrugosidade, potencia o contacto do mástique com a superfície dos agregados, mas aumenta a sensibilidade à água da mistura betuminosa, facilitando a intromissão da água na interface dos dois materiais.

Quando se dá o desprendimento das partículas de uma mistura betuminosa, a rotura que ocorre pode, assim, observar-se de três zonas distintas, conforme ilustrado na figura 4.2, às quais correspondem as seguintes designações:

- **rotura coesiva**, se a rotura se dá pelo mástique ou pelo agregado;
- **rotura adesiva**, se a rotura ocorre na interface entre o agregado e o mástique betuminoso.

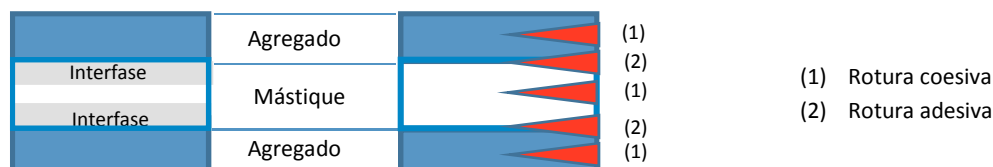


Figura 4.2 Tipos de rotura: coesiva e adesiva

Existem três mecanismos através dos quais a água degrada as misturas betuminosas (Bahia *et al.*, 2010):

- **diminuição da coesão do betume.** Este fenómeno acontece quando a água reage com o betume, emulsionando-o, resultando assim uma diminuição das características do betume;
- **perda de adesão entre o agregado e o betume.** A água, porque possui maior afinidade ao agregado que o betume, quando atinge a interface entre o agregado e o mástique, provoca o descolamento do mástique da superfície do agregado;
- **alteração do agregado.** Quando no fabrico da mistura betuminosa são usados agregados, que apresentam elevada alterabilidade em presença da água, verificando-se a diminuição das suas propriedades mecânicas, aspeto que pode conduzir à rotura coesiva no agregado.

No entanto, a forma mais corrente de observar o desprendimento numa mistura betuminosa é por rotura adesiva, no plano interfacial entre a superfície do agregado e o mástique betuminoso, que em muitos casos, após ocorrer esta rotura, pode observar-se a evolução para ocorrência igualmente de rotura coesiva no mástique betuminoso.

Mas pode também ocorrer a rotura coesiva pelo mástique betuminoso, quando por exemplo a adesividade agregado mástique é muito elevada, superior à tensão de rotura de tração do mástique, situações em que o betume se torna frágil por baixas temperaturas.

Quando a espessura do filme de mástique é inferior a 60 μm , é de esperar como mais provável a rotura adesiva, sendo que para espessuras superiores a ocorrer rotura ela

possa ser do tipo coesiva ou no agregado ou, mais frequentemente, no mástique betuminoso (Jakarni, 2012).

A suscetibilidade de uma mistura betuminosa ao desprendimento não varia muito com o tipo de betume, sendo sim fortemente dependente do tipo de agregado utilizado, estando os agregados calcários e basálticos geralmente associados a um bom comportamento e os agregados graníticos normalmente associados a piores comportamentos (Jakarni, 2012).

Na prática a adesão inicial agregado/mástique betuminoso e a sua manutenção no tempo depende de múltiplos fatores (Read & Whiteoak, 2003):

- **agregados e filer:** dimensão; textura da superfície; porosidade; angulosidade; presença de pó; teor em água; mineralogia; forma; carga elétrica superficial; durabilidade, desgaste e distribuição granulométrica da mistura dos agregados;
- **betume:** reologia; polaridade elétrica; constituição química, resistência ao envelhecimento e espessura do filme de betume;
- **mistura betuminosa:** porosidade; permeabilidade; tipo de mistura; compactação; temperatura da mistura betuminosa no fabrico, espalhamento e compactação, e tempo de amassadura.

Para além das características da mistura betuminosa e seus constituintes, a adesão inicial depende ainda de outros fatores: condições climáticas de pluviosidade, temperatura, humidade, ciclos de temperatura e exposição à radiação solar; pH da água; presença de sais; drenagem e tráfego.

A suscetibilidade à água de uma mistura betuminosa é normalmente mais influenciada pelas características dos agregados e do filer do que propriamente pelo tipo de betume. Para a generalidade dos agregados hidrófilos como os basálticos ou calcários, o tipo de betume não influencia significativamente as características finais da mistura betuminosa, no que diz respeito à sensibilidade à água. No entanto, a utilização de agregados com estas origens geológicas, não é garantia de um bom comportamento da mistura betuminosa, porque, como ficou dito, muitos são os fatores que influenciam o comportamento da mistura betuminosa, tendo-se verificado vários insucessos mesmo com a utilização destes tipos de agregados.

Certos tipos de agregados apresentam-se particularmente sensíveis ao desprendimento, sendo que os fatores que mais contribuem para a perda da adesão

entre os agregados e o mástique betuminoso são de natureza climáticos, tais como o calor, forte chuva, ciclos de gelo/degelo e o tráfego principalmente o tráfego de pesados. Em termos práticos, os agregados podem ser do tipo ácido, em que a superfície tende a ser carregada negativamente, ou do tipo básico, em que as superfícies têm tendência a apresentarem-se carregadas positivamente. Alguns betumes, especialmente os que apresentam elevada acidez, têm tendência a apresentarem-se negativamente carregados, pelo que podem ocorrer problemas de adesão com agregados ácidos. Este efeito conduz a uma repulsão eletrostática no sistema, também designada por tensão superficial.

Na realidade, agregados com características mais ácidas, ou seja que possuem maiores teores em sílica (SiO_2), apresentam maiores dificuldades em termos de adesão ao mástique, mas por outro lado, possuem melhores características no que diz respeito ao polimento das superfícies, pelo que são, em muitas aplicações, selecionados para as misturas betuminosas das camadas de desgaste, precisamente a camada do pavimento onde o efeito da água é inevitável.

A água pode ocorrer à superfície dos agregados constituintes da mistura betuminosa de diferentes formas:

- vinda do interior dos agregados mal secos;
- da chuva através das bermas, fendas na camada ou pavimentos porosos;
- nível freático elevado, criando pressões hidrostáticas;
- absorção capilar vinda de camadas inferiores, granulares ou não;
- em forma de vapor de água, vindo dos materiais das camadas granulares.

Por outro lado, o aparecimento da água à superfície dos agregados pode ser facilitado nas seguintes situações:

- adoção no pavimento de misturas mais suscetíveis à água;
- formulações com baixas percentagens de betume;
- misturas mal compactadas ou com elevada porosidade;
- má drenagem das camadas inferiores;
- presença de material argiloso ou pó na superfície dos agregados;
- condensação de vapor de água sob camadas impermeáveis.

A perda de adesão provoca de forma isolada ou simultânea as seguintes patologias: fendilhamento, deformações, exsudação do betume à superfície e formação de ninhos e covas, patologias estas com maior probabilidade de ocorrerem em climas chuvosos e para elevado volume de tráfego pesado.

As características químicas do mástique betuminoso e do agregado na interface entre os dois componentes é de primordial importância e pode ser a principal responsável pelo fenómeno de descolamento. A afinidade química pode ser melhorada por adição de aditivos promotores de adesão, em que o princípio de atuação consiste em alterar quimicamente o betume ou a superfície do agregado.

Resumindo, a intensidade com que ocorre a adesão entre o mástique betuminoso e o agregado depende de muitos fatores, começando desde logo pelas características dos materiais em presença e não menos importante da forma como ocorre o contacto entre os materiais. A adesão entre os materiais requer um bom contacto entre eles, e qualquer outro material que se intrometa nesse contacto, como água ou pó, implicará uma redução desse contacto e consequentemente uma menor adesividade.

4.2.2. Teorias da adesão nas misturas betuminosas

Numa mistura betuminosa parte do betume é adsorvido pela superfície dos agregados, ocorrendo a migração de algumas frações do betume, aspeto que conduz a uma maior resistência ao desprendimento por adesividade, mas que, simultaneamente, enfraquece a estrutura molecular na zona do betume mais afastada do agregado, facilitando assim o descolamento coesivo da mistura. Também os poros dos agregados abertos ao exterior podem estabelecer-se como filtros, fracionando as moléculas de betume, fazendo com que as moléculas maiores e mais densas se concentrem na interfase dos materiais em presença, conduzindo a uma rigidificação do betume nesta zona.

As forças que surgem, após o contacto entre o agregado e o mástique betuminoso, responsáveis pela adesão entre os dois materiais e cuja magnitude estabelece a maior ou menor adesividade entre eles, são de natureza física e química podendo ocorrer vários tipos de forças em simultâneo:

- intermoleculares do tipo eletrostáticas entre iões que desempenham um papel fundamental na adesão;
- intermoleculares do tipo eletrostáticas de Van der Waals;
- forças Keesom;

- forças Deby;
- ligações de hidrogénio.

Existem várias teorias para justificar a adesão entre o mástique betuminoso e os agregados: mecânica, eletrostática, adsorção e química.

4.2.2.1. Teoria mecânica

Esta teoria foi estabelecida inicialmente por McBain e Hopkins em 1925, citado por Silva *et al.*, 2011 e estabelece resumidamente que, o mástique betuminoso, no seu estado fluido durante a amassadura, penetra nos poros do agregado abertos ao exterior, e devido ao seu arrefecimento e consequente aumento da viscosidade, torna-se mais rígido, formando assim ancoragens físicas que dificultam o desprendimento do mástique da superfície do agregado.

Esta teoria explica que agregados de elevada superfície específica e textura superficial, apresentam melhor adesão do que agregados polidos. No entanto, como será referido de seguida, agregados muito angulosos podem dificultar o contacto agregado/mástique e gerar tensões superficiais que dificultam a penetração do mástique nos poros do agregado. Esta é a razão pela qual, em alguns trabalhos experimentais, se verificaram menores valores da adesão com a utilização de agregados mais angulosos.

A teoria mecânica é hoje em dia ainda defendida, pela consideração de três aspetos fundamentais apresentados inicialmente por Pocius em 1997 (Silva *et al.*, 2011) e descritos por (Hefer & Little, 2005):

- mecanismo físico tipo chave/fechadura, baseado no facto de se verificar que quanto maior a porosidade e as irregularidades da superfície do agregado, maior vai ser a quantidade de adesivo, gerando-se como que ancoragens físicas entre os dois materiais;
- redistribuição de tensões. As superfícies rugosas permitem uma melhor dissipação de tensões, evitando alterações bruscas de estados de tensões entre secções contíguas;
- o aumento da área da superfície de contato tem como consequência o acréscimo da adesão entre o substrato e o adesivo.

Concluindo, segundo a teoria mecânica, quanto mais porosos são os agregados e mais rugosas forem as suas superfícies, maior é a adesividade mástique/agregado, podendo, no entanto, essas características, dificultar o envolvimento total do agregado por parte do mástique betuminoso (Lent *et al.*, 2011).

Comprovadamente a teoria mecânica não se aplica apenas à escala macroscópica, mas também, à escala microscópica. Equipamentos para a medição de ângulos de contacto ou o microscópio de força atômica, AFM “*Atomic Force Microscopy*”, representado na figura 4.3, permitem avaliar as forças verticais e tangenciais geradas por dois materiais em contacto (Pearce, 2007 e Hefer & Little, 2005).



Figura 4.3 Microscópio de força atômica (AFM)
www.imc.cas.cz/en/umch/o_membr_eq.htm

4.2.2.2. Teoria eletrostática

Esta teoria, estabelecida em 1955 por Deryaguim, citado por Silva *et al.*, 2011 defende que todos os fenómenos de adesão podem ser explicados pela eletrostática (Hefer & Little, 2005). Quando o mástique betuminoso contacta com a superfície do agregado, a existência de iões polares na superfície do agregado faz com que as moléculas do mástique tendam a orientar-se, por forma a satisfazer a energia exigida pela superfície do agregado. A existência de uma diferença de potencial eletroquímico entre dois materiais em contacto, conduz a que as cargas iónicas elétricas tendam a criar uma película ao longo da interface, formando um campo de dupla camada elétrica.

A teoria eletrostática comprova a maior afinidade dos agregados à água do que ao mástique betuminoso. Na realidade, a maior parte das moléculas presentes no mástique são não-polares, enquanto que as moléculas de água são polares e, portanto, capazes de melhor satisfazer as exigências energéticas da superfície dos agregados.

A adesão por fenómenos polares verifica-se pela atração de cargas elétricas opostas. Normalmente, este fenómeno gera força adesivas muito elevadas, que, no entanto, se verificam ser muito suscetíveis à água, sendo esta capaz, em muitos casos, de as anular ou, pelo menos, reduzir de intensidade (Pavol *et al.*, 2011).

4.2.2.3. Teoria da adsorção, termodinâmica ou da energia superficial livre

A teoria da adsorção está relacionada com as propriedades termodinâmicas dos materiais em presença e apresenta-se como a teoria de maior aceitação para explicar os fenómenos de adesão, que se estabelecem entre o mástique betuminoso e o agregado (Silva, 2005), defendendo que a adesão, entre estes dois materiais, se deve às forças intermoleculares estabelecidas no contacto entre eles ao nível molecular.

A adesão será tanto maior, quanto maior a energia superficial livre, entendendo-se por energia superficial livre como o trabalho que é necessário estabelecer para se criar uma nova superfície em dois materiais aderidos. O deslocamento de um líquido sobre o outro numa superfície sólida é resultado das tensões superficiais que atuam nas zonas de contacto. Mais concretamente, no caso de uma mistura betuminosa, o trabalho que é necessário realizar pela água para romper as forças adesivas entre o agregado e o mástique e desta forma descolar este último, é dado pela equação 4.1 e pode ser esquematizado conforme indicado na figura 4.4 (Bhasin, 2006).

$$W_{AMW} = \gamma_{AW} + \gamma_{MW} - \gamma_{AM} \quad [4.1]$$

Em que:

W_{AMW} – Trabalho exercido pela água, para descolar o mástique da superfície do agregado;

γ_{AW} – Energia superficial livre entre o agregado e a água;

γ_{MW} – Energia superficial livre entre o mástique e a água;

γ_{AM} – Energia interfacial/intermolecular entre o agregado e o mástique.

Em muitos casos o trabalho W_{AMW} toma um valor negativo, querendo isto dizer que o deslocamento do mástique da interface deste material com o agregado, devido à água, é um fenómeno termicamente favorável. No entanto, na maior parte das misturas

betuminosas a água terá dificuldade em romper as ligações adesivas entre o mástique e o agregado.

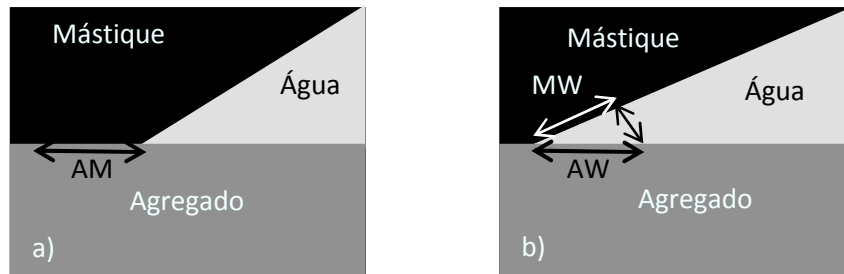


Figura 4.4 Esquema da intromissão da água na ligação entre o mástique betuminoso e o agregado a) antes do descolamento b) após o descolamento

De forma a alcançar o equilíbrio é necessário que se verifique a igualdade estabelecida na equação de Young [4.3].

$$\gamma_{AM} = \gamma_{AW} + \gamma_{MW} \cos \theta_{AM} \quad [4.3]$$

As duas expressões anteriores permitem obter a equação [4.4].

$$W_{AMW} = \gamma_{MW} (1 + \cos \theta_{AM}) \quad [4.4]$$

Esta expressão evidencia que, o trabalho que é necessário realizar pela água para descolar o mástique da superfície do agregado é proporcional à tensão superficial estabelecida entre o mástique e a água e ao ângulo de contacto entre o mástique e o agregado. No caso dos materiais em análise, o ângulo de contacto θ entre o mástique e o agregado, é sempre inferior a 90° , logo o fator $1 + \cos \theta_{AM}$ é sempre superior a 1, pelo que é grande o trabalho que a água necessita realizar para remover o mástique da superfície do agregado. Uma das formas de aumentar o contacto entre os dois materiais é, assim, a utilização de aditivos que permitam diminuir, tanto quanto possível, o ângulo de contacto entre os materiais a ligar.

No interior de uma partícula de agregado, as moléculas encontram-se rodeadas por todos os lados por outras moléculas, mantendo-se assim a mesma distribuição de forças intermoleculares em todas as direções, observando-se uma energia de ligação

muito superior à verificada pelas moléculas da superfície da partícula. O mesmo fenómeno se passa obviamente com o mástique. Quando os dois materiais, agregado e mástique betuminoso, entram em contacto um com o outro, o mástique tem tendência a formar uma membrana elástica na superfície do agregado, resultando um rearranjo molecular nessa interfase que passa a suportar forças de menor intensidade. Às forças estabelecidas nessa “membrana” superficial é dado o nome de tensão superficial e, quanto menor esta tensão, maior será o poder de espalhamento do mástique sobre a superfície do agregado, aumentando assim o ângulo de contacto entre os dois (Herrero *et al.*, 2009).

O conhecimento da forma da gota de um líquido colocada sobre uma superfície, nomeadamente o ângulo de contacto entre os dois materiais, pode dar indicações sobre a grandeza das forças intermoleculares que se estabelecem entre os dois (Freitas, 2007).

Conforme pode ser analisado pelos esquemas da figura 4.5, observando-se um ângulo de contacto entre o substrato sólido, constituído pelo agregado e o adesivo líquido, constituído pelo mástique betuminoso, superior a 90° , significa que a molhabilidade do agregado por parte do mástique é pequena, dificultando assim o contacto entre os dois materiais em presença. Se por outro lado, o ângulo de contacto é inferior a 90° a molhabilidade é forte, facilitando assim uma boa adesão entre os materiais (Pearce, 2007). Pode, pois, afirmar-se que quanto menor o ângulo de contacto entre o mástique betuminoso e o agregado, maior é a probabilidade de no final se obter elevada adesividade entre os dois materiais.

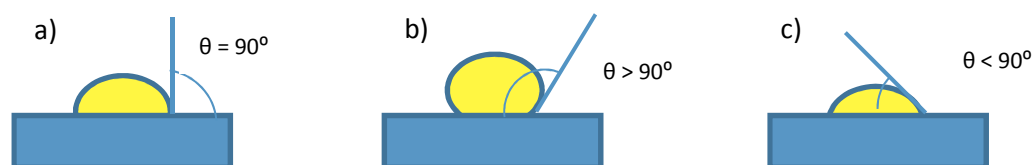


Figura 4.5 Esquemas representativos de diferentes ângulos de contacto entre um líquido e um sólido: a) igual a 90° b) superior a 90° c) inferior a 90°

4.2.2.4. Teoria química

A teoria baseada na composição química dos agregados e dos mástiques betuminosos permite explicar que diferentes tipos de mástiques e diferentes origens geológicas de agregados apresentam valores de adesividade, por vezes significativamente diferentes

quando a água se interpõem na ligação. As características químicas da superfície dos agregados conduzem a comportamentos bem distintos quanto à afinidade do agregado à água, podendo os agregados ser definidos como hidrófilos se apresentam afinidade à água ou hidrofóbicos no caso contrário. Os agregados siliciosos, quando comparados com os agregados calcários, apresentam-se normalmente menos básicos e com características hidrófilas, observando-se, por parte deste tipo de agregados, maior dificuldade em estabelecer uma boa adesão ao mástique betuminoso, apresentando maior suscetibilidade ao desprendimento, ou seja, à rotura por adesão. O valor do pH quer do mástique betuminoso quer da superfície dos agregados afeta a adesão entre os dois componentes. Também o pH do meio em contacto pode contribuir para uma instabilização das forças adesivas. No caso de agregados calcários, valores do pH da água inferiores a 6 favorecem a dissolução dos carbonatos e para agregados siliciosos, como por exemplo os granitos, para valores de pH superiores a 8, pode ocorrer a dissolução da sílica (Jamieson, *et al.*, 1993).

A teoria química para explicar a adesão entre os materiais baseia-se no princípio da existência de forças Van der Waals, forças estas que se estabelecem na interfase entre os dois materiais. Na realidade, tratando-se o betume de um material constituído essencialmente por hidrocarbonetos apolares, ou seja, constituído maioritariamente por moléculas não polares, organizadas em cadeias de anéis de carbono saturados de hidrogénio, não é possível o estabelecimento de ligações iónicas em grande número, mas sim ligações do tipo Van der Waals. Apesar das forças geradas serem do tipo Van der Waals e, portanto, de pequena magnitude, as moléculas não polares apresentam grande dimensão quando comparadas com as moléculas polares, gerando-se, assim, forças adesivas de relativa importância.

Com a modificação dos betumes, através de polímeros ou por granulado de borracha, ou pela adição de fileres ativos, tais como a cal hidratada, as ligações iónicas podem ser reforçadas, o que poderá justificar a maior adesividade obtida em misturas betuminosas com utilização de betumes modificados ou cal hidratada como filer.

A adsorção do betume a fileres de origem siliciosa é fundamentalmente mecânica, dada a fraca afinidade química do betume a superfícies ácidas, enquanto que no caso de fileres básicos, como os fileres de origem calcária a adsorção do betume, para além de mecânica, é também química, resultando por isso uma maior adesividade.

A perda de adesão por ação da água não pode ser explicada por apenas uma das teorias. A contribuição de cada uma delas para a ocorrência dos possíveis fenómenos

que conduzem à perda de adesão entre o mástique e o agregado e, consequente rotura adesiva da mistura betuminosa, foi esquematizada por Yilmaz & Sargin em 2012, e é apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Correspondência entre os mecanismos de rotura e as teorias da adesão (Kiggundu & Roberts, 1988)

Mecanismo de rotura	Teoria Mecânica			Teoria da Energia Superficial Livre			Teoria Química		
	F	Q	F/Q	F	Q	F/Q	F	Q	F/Q
Desprendimento	P			P	S				
Deslocamento				P				P	
Emulsificação							P	S	
Rotura filme	P								
Porosidade	P								
Rotura hidráulica	P								
Instabilidade pH						P		P	

F – Física; Q – Química; F/Q – Físico-química; P – Principal; S – Secundário

É comum considerar-se que o betume apresenta maior afinidade a agregados do tipo calcário, vulgarmente considerados com características básicas, do que a agregados graníticos, do género ácidos (Judele, 2011). Um relatório, de 2013, do Western Research Institute refere que os agregados de origem calcária, apresentam melhor adesão ao betume e maior resistência à rotura em presença da água, do que os agregados graníticos. No entanto, em 2003, os resultados obtidos através de ensaios de envelhecimento do agregado realizados por Huang *et al.*, permitiram aos autores concluir, que também a estrutura química do agregado é responsável pelo modo como a adesão agregado/mástique se estabelece.

A maior parte das patologias dos pavimentos, no que respeita ao desprendimento da mistura betuminosa da camada de desgaste, estão associadas a agregados graníticos. No entanto, a existência de muitos pavimentos constituídos por misturas betuminosas com agregados graníticos sem qualquer problema de desprendimentos e outros com agregados de outras origens geológicas, como os calcários em que se verifica este tipo de patologia, pode levar a concluir que nem só a origem geológica do agregado é

responsável pela perda de afinidade em presença da água, havendo com certeza outros fatores importantes na ocorrência deste fenómeno.

4.3. Comportamento do mástique betuminoso

Quando se adiciona filer a um betume, obtém-se uma mistura que se designa por mástique betuminoso e que corresponde à suspensão do filer no betume.

Ocupando o filer uma parte significativa do volume do mástique betuminoso, torna-se importante conhecer as propriedades do filer, nomeadamente as suas características superficiais, como a superfície específica, porosidade e textura, quando se escolhe a relação entre o filer e o betume a considerar na formulação da mistura betuminosa. Fileres de elevada porosidade e superfície específica e de textura superficial muito rugosa podem conduzir à necessidade de aumentar a dosagem de ligante, tornando-se economicamente desvantajosa a utilização deste tipo de fileres.

Algumas especificações técnicas, como por exemplo a edição de 1990 do caderno de encargos da extinta Junta Autónoma de Estradas, entretanto revogada, não tinha este aspeto em consideração, definindo um intervalo a observar pela relação ponderal filer/betume, independente de qualquer tipo ou propriedade do filer.

As partículas de filer, ao entrarem em contacto com o betume, como este se encontra num estado pouco viscoso, vão absorver e adsorver parte do betume. O restante betume irá ocupar os vazios do filer, sendo pois muito importante o conhecimento desta característica. Assim, para pequenas concentrações de betume, o comportamento do mástique será regulado especialmente pela viscosidade intrínseca do filer e para elevadas dosagens de betume o comportamento será ditado especialmente pela viscosidade do próprio betume. No esquema da figura 4.6 são representadas as relações volumétricas dos componentes do mástique (Bahia, 2011)

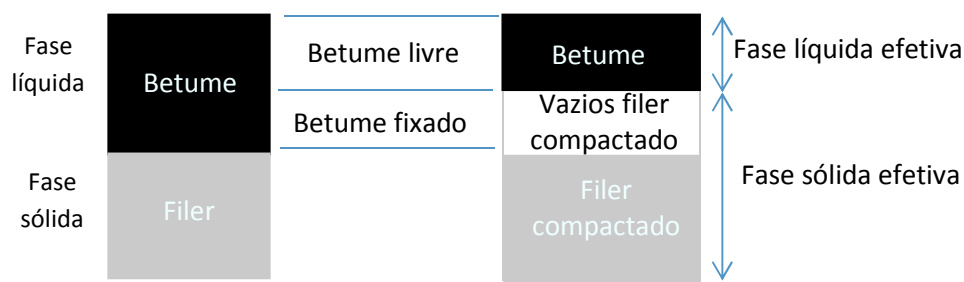


Figura 4.6 Esquema das relações volumétricas dos componentes do mástique betuminoso

Einstein, em 1911, citado por Teixeira 2012, observou que, para pequenas concentrações de filer no mástique, situação para a qual o comportamento é ditado pelo betume, a viscosidade da mistura aumenta linearmente com o aumento da dosagem do filer, a uma taxa relacionada com um coeficiente η' , designado por coeficiente de Einstein. Este coeficiente representa a viscosidade intrínseca das partículas e é dado pela expressão [4.5].

$$\eta_r = 1 + \eta' * \emptyset_v \quad [4.5]$$

Onde:

η_r – Viscosidade relativa do mástique, ou seja relação entre a viscosidade do mástique e a viscosidade do betume;

η' - Coeficiente de Einstein. Parâmetro empírico que depende das características do filer;

\emptyset_v – Concentração volumétrica do filer

$$\emptyset_v = \frac{V_f}{V_f + V_b} \quad [4.6]$$

Em que:

V_f – Volume do filer no mástique;

V_b - Volume do betume no mástique.

Muitos autores estudaram o comportamento de vários mástiques produzidos com diferentes tipos de fileres e obtiveram diferentes valores do coeficiente η' . No entanto, a equação [4.5] apenas é válida para concentrações de filer muito baixas, aproximadamente inferiores a 0,2, não sendo pois adequada no caso das misturas betuminosas em que a concentração de filer é bastante superior, próxima de 1.

Quando a viscosidade do mástique tende para infinito, ou seja, a concentração do filer é máxima, o valor do coeficiente de Einstein passa a ser função da concentração máxima de filer e o seu valor é dado por:

$$\eta' = \frac{2}{\varphi_m} \quad [4.7]$$

Onde:

φ_m — Representa a concentração máxima de filer e tem em conta a concentração a partir da qual o mástique deixa de apresentar um comportamento de um líquido viscoso.

Já em 1915, Richardson concluía que o filer não é apenas um material responsável pelo preenchimento dos vazios deixados pela mistura de agregados, mas intervinha física e quimicamente no mástique betuminoso, defendendo que a espessura do filme de betume adsorvido pela superfície do filer e, conseqüentemente, modificado pela presença do filer, depende das características do filer e do betume.

Em 1937, Traxler, citado por Huang *et al.*, 2007, considerava que, apesar do valor dos vazios do filer seco compactado ser um parâmetro muito importante, a distribuição granulométrica, o diâmetro das partículas, a forma, a textura superficial e a superfície específica são, também, características com grande influência no comportamento do mástique. O autor concluía, assim, que o efeito rigidificante do mástique betuminoso, apenas pode ser avaliado através de ensaios realizados neste material, não podendo ser previsto através das propriedades do filer.

Rigden defendia, em 1947, que o betume apresenta duas frações no mástique: o betume fixado, correspondente à fração do betume que preenche os vazios deixados pelo filer compactado, chamando à restante fração do betume como betume livre. Esta fração seria responsável pela consistência do mástique, ou seja, quanto menor a percentagem de vazios do filer, menor a fração do betume fixado, e maior a fração do betume livre e, conseqüentemente, menor a viscosidade do mástique, defendendo ainda que a viscosidade do mástique é independente do tipo de filer e do tipo de betume.

Trabalhos realizados mais recentemente vêm, no entanto, contrariar as conclusões formuladas por Rigden. O poder rigidificante do filer sobre o mástique a uma determinada temperatura depende não só do tipo de filer, mas também do tipo de betume e das interações químicas e físicas que se estabelecem entre os dois componentes. Esta conclusão é defendida há muitos anos por diferentes autores, como Traxler em 1937, Anderson & Goetz em 1973, Craus *et al.*, em 1978 e Anderson *et al.*, em 1994. O comportamento de um mástique betuminoso não pode ser previsto através

do conhecimento apenas de uma das propriedades do filer, dado o elevado número de variáveis a influenciar esse comportamento.

A adsorção de determinados componentes do betume por parte do filer é função obviamente da composição química dos dois materiais em presença, através de ligações covalentes, mas é também influenciada pela forma das partículas, textura da superfície e porosidade aberta ao exterior, através de forças Van der Waals.

Em 1962, Tunnicliff considera a distribuição granulométrica do filer como uma característica fundamental para a forma como as partículas de filer adsorvem o betume. O mesmo autor identifica duas camadas de betume que envolvem a partícula de filer (figura 4.7): uma primeira camada junto à superfície da partícula de filer a que corresponde o betume adsorvido e uma outra camada de betume, exterior à primeira, em que defendia a existência de um gradiente no efeito do filer em termos de rigidificação do betume, sendo maior junto à primeira camada influenciada pela adsorção, diminuindo com o aumento da distância àquela camada.

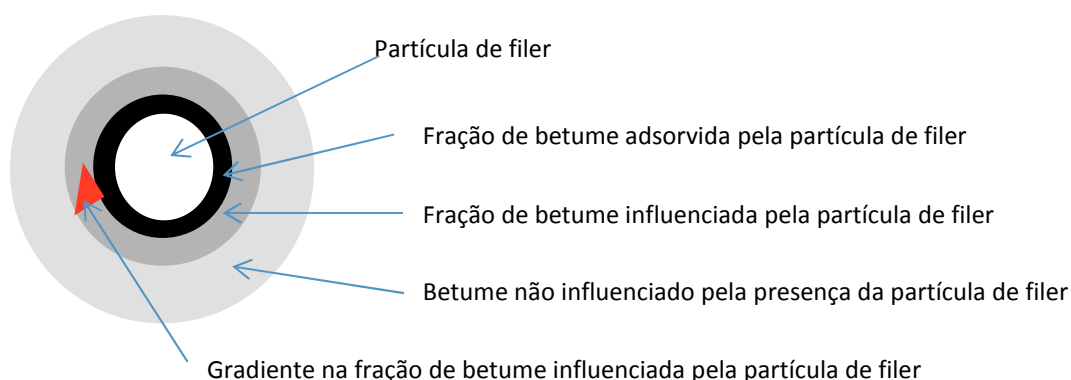


Figura 4.7 Esquema sobre a influência de uma partícula de filer no betume que a envolve, adaptado de Bahia, 2011

Esta teoria, ainda hoje defendida por muitos investigadores, é capaz de explicar alguns comportamentos:

- diferentes fileres, com a mesma maior dimensão, idêntica distribuição granulométrica, forma, textura superficial e superfície específica conduzem a características de rigidez do mástique distintas no caso dos fileres apresentarem diferentes características mineralógicas e/ou químicas;

- fileres com a mesma fração de betume fixado, ou seja, o mesmo valor dos vazios do filer seco compactado (Rigden), originam diferentes níveis de rigidificação no mástique.

Winniford, 1961 conclui nos seus estudos que a rigidez do mástique aumenta com o aumento da dosagem do filer mais do que o previsto pela expressão linear de Einstein. Este autor demonstrou, igualmente, a importância das características do betume no comportamento final do mástique e que a utilização de betumes com elevado teor de asfaltenos com fileres do tipo ácido, resulta numa menor viscosidade, quando comparados com a utilização de fileres do tipo básicos.

Craus *et al.* em 1978 analisaram o comportamento dos mástiques e das misturas betuminosas, concluindo que a forma das partículas de filer e a textura da superfície, influenciam as ligações que se estabelecem entre as partículas de filer e o betume, alterando, consequentemente, o comportamento reológico do mástique. Esta influência na reologia do mástique conduz à alteração na percentagem ótima em betume da mistura betuminosa e no desempenho da própria mistura. Fileres com a mesma origem geológica que apresentam elevada angulosidade, textura rugosa e de grande superfície específica, conduzem a um aumento da viscosidade do mástique betuminoso, diminuindo o valor da penetração, aumentando a temperatura anel e bola e reduzindo a ductilidade do mástique.

Em 1994, Jamieson *et al.*, no âmbito do programa SHRP e através da utilização dos equipamentos da metodologia SUPERPAVE "*Superior Performing Asphalt Pavements*", estudaram o potencial rigidificante dos fileres, tendo concluído ser a relação filer/betume o fator mais importante, definindo o intervalo de 0,6 a 1,2 como o mais adequado. Esta foi a metodologia adotada na formulação de misturas betuminosas pelo método SUPERPAVE. No entanto Smit *et al.*, em 2001, com base nos resultados obtidos em ensaios laboratoriais, estabeleciam algumas críticas à fixação deste intervalo.

Ensaio com viscosímetro rotativo e ensaios de variação da temperatura anel e bola permitiram a Horak & Makundila em 2011, observar um aumento do efeito rigidificante do filer de forma quase linear até valores de relações filer /betume em massa próximas de 1, ou seja, para valores de relação volumétrica próxima de 0,38, para a maior parte dos fileres. Para concentrações de filer no mástique inferiores aquele valor, o comportamento do mástique é definido pelo betume, correspondendo à zona linear da lei de Einstein. Observaram, ainda, que para valores superiores da relação filer/betume,

o comportamento passa a ser definido pelo filer e o aumento da rigidificação do mástique torna-se exponencial.

Em 2003, Kim & Little, demonstraram que a influência do filer no mástique é mais significativa com o aumento da concentração do filer, defendendo que quanto mais elevada a concentração do filer no mástique, mais relevantes se tornam as interações entre o filer e o betume. Em 2008 Faheenem *et al.*, ao realizarem ensaios com fileres de diferentes origens mineralógicas, identificaram que, para além do valor da concentração do filer no mástique, também a mineralogia do filer interfere no poder rigidificante do filer no mástique. Estes autores, citados por Bahia em 2011, definiram um comportamento ainda hoje aceite, dividido em três fases, conforme esquematizado na figura 4.8:

fase 1 – Esta fase inicial, corresponde a baixas concentrações do filer no mástique, em que as partículas do filer se encontram relativamente afastadas umas das outras, observando-se existência de betume livre. Nesta fase o acréscimo da rigidez com o aumento da concentração do filer é constante e segue a lei linear designada por assintota de Einstein, (Genovese, 2012);

fase 2 – Concentração crítica. Corresponde à concentração para a qual se verifica que todo o betume se encontra totalmente adsorvido ou afetado pela presença do filer, com betume livre em percentagem muito reduzida.

fase 3 - Fase final. Esta fase, de elevada concentração de filer, caracteriza-se por um mástique de elevada rigidez, sendo praticamente impossível realizar a suspensão da totalidade das partículas do filer no betume.

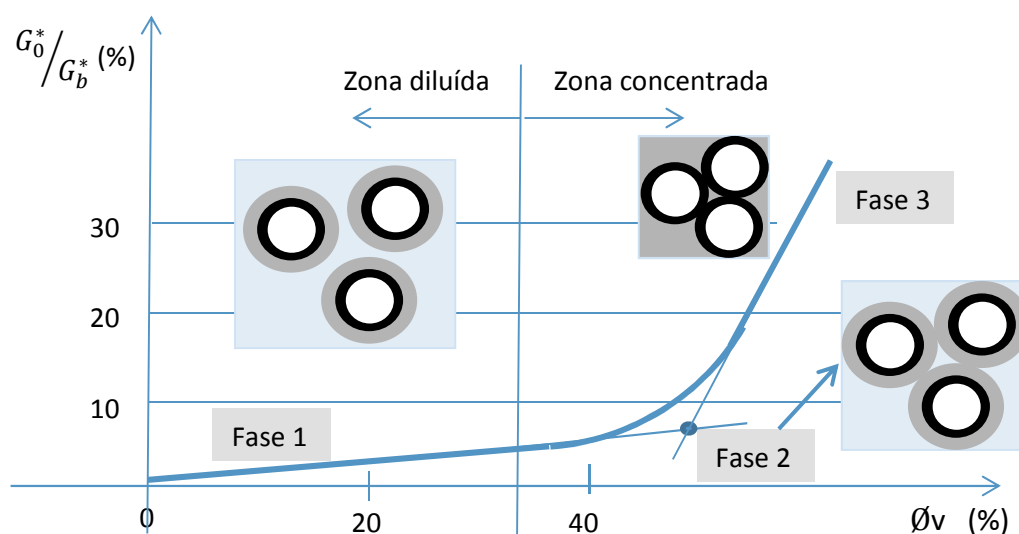


Figura 4.8 Rigidez relativa do mástique em função da concentração do filer, adaptado de Bahia, 2011

Como já referido, a equação de Einstein apenas é válida para concentrações de filer muito baixas, pelo que, desde então, vários autores estudaram esta questão. Lesueur & Little, em 1999, concluem que a interação entre o filer e betume varia com o tipo de betume utilizado no mástique. Estes autores utilizaram a expressão Marion-Pierce, para prever a rigidificação do mástique em função da fração volumétrica do filer no mástique. A expressão pode tomar duas formas, conforme a rigidificação seja avaliada em termos da viscosidade [4.8] ou em termos de rigidez ao corte [4.9]:

$$\eta_m = \eta_b \left(1 - \frac{\emptyset_v}{\emptyset_m}\right)^{-2} \quad [4.8]$$

Onde:

η_m - Viscosidade do mástique;

η_b - Viscosidade do betume;

\emptyset_v - Percentagem da fração volumétrica do filer no mástique;

\emptyset_m - Fator que depende do tipo de filer.

$$G_m = G_b \left(1 - \frac{\emptyset_v}{\emptyset_m}\right)^{-2} \quad [4.9]$$

Onde:

G_m - Rigidez ao corte do mástique (MPa);

G_b - Rigidez ao corte do betume (MPa).

Segundo Lesueur & Little (1999), para fileres minerais, o fator \emptyset_m toma o valor de 63%.

O efeito rigidificante do filer no mástique pode ser previsto igualmente pelo modelo de Nielsen (Huang *et al.*, 2007) expresso na equação [4.10].

$$\frac{G_m}{G_b} = \frac{1 + A B \emptyset_v}{1 - B \Psi \emptyset_v} \quad [4.10]$$

Com:

$$A = \eta' - 1 \quad [4.11]$$

$$B = \frac{\frac{G_f}{G_b} - 1}{\frac{G_f}{G_b} + A} \quad [4.12]$$

$$\psi = 1 + \frac{1 - \emptyset_m}{\emptyset_m^2} \emptyset_v \quad [4.13]$$

Sendo:

G_f - Rigidez ao corte do filer (MPa)

Em 1999 Buttlar *et al.* propõem uma outra equação para a previsão da rigificação do mástique pelo filer [4.14]. Segundo os autores, a expressão é válida para valores da concentração do filer compreendidos entre 0 e 1, e para valores da rigidez do betume entre 0,035 e 3500 MPa.

$$\frac{G_m}{G_b} = A e^{B \cdot \emptyset_v} \quad [4.14]$$

Onde:

$$A = 25,083 \emptyset_v^3 - 10,154 \emptyset_v^2 + 4,8767 \emptyset_v + 0,831$$

$$B = -1,28 \times 10^{-3} \emptyset_v^3 + 3,37 \times 10^{-4} \emptyset_v^2 - 3,08 \times 10^{-4} \emptyset_v + 6,53 \times 10^{-6}$$

Para que na prática uma mistura betuminosa possua um comportamento flexível, torna-se necessário que na formulação da mistura, a relação volumétrica entre o filer e o mástique não ultrapasse um determinado valor, conhecido por concentração crítica.

Entende-se por concentração crítica do filer (C_c) a relação volumétrica entre o filer e o mástique, para a qual o mástique deixa de possuir um comportamento de um fluido viscoso, passando para um comportamento de um sólido plástico. Este parâmetro

corresponde a uma concentração em que as partículas de filer se movem no betume de forma livre, sem impedimentos, devido à proximidade de uma outra partícula, mas mantendo o contacto com as restantes partículas que a rodeiam.

$$C_c = \frac{P_f}{V_a \times \rho_f} \quad [4.15]$$

Sendo:

C_c – Concentração crítica do filer;

P_f – Massa do filer, em grama, considerado no ensaio da baridade do filer em querosene;

V_a – Volume do filer, em centímetro cúbico, obtido no ensaio da baridade do filer em querosene;

ρ_f – Massa volúmica do filer, em grama por centímetro cúbico.

Segundo Pinilla, em 1965, a concentração crítica depende das características dimensionais e geométricas das partículas do filer, bem como da sua porosidade aberta ao exterior. Fileres de partículas de maior tamanho tendem a apresentar valores de concentração crítica inferiores, enquanto que fileres de partículas menos angulosas e de formas mais próximas da forma esférica, apresentam valores de C_c mais elevados. Também Kandal, em 1980, verificou que de uma forma geral, fileres de granulometrias mais finas conduzem a mástiques mais viscosos, tendo também concluído que, a forma das partículas não é uma propriedade que influencie de forma significativa a viscosidade do mástique.

Por outro lado, fileres como a cal hidratada, devido à sua elevada atividade química e elevada superfície específica, tendem a dificultar a sua suspensão no betume, formando aglomerados de partículas devido às forças Van Der Waals que se geram com elevada grandeza e que a energia, empregue durante a amassadura das misturas betuminosas nas centrais de misturas betuminosas, não é capaz de anular. Verifica-se, assim, para este tipo de filer, que as partículas não se encontram em suspensão no mástique de forma individualizada, observando-se uma grande quantidade de aglomerados de partículas, aspeto que pode alterar significativamente o valor da concentração crítica deste filer.

4.4 Metodologias para o estudo laboratorial

A normalização europeia não prevê metodologias de ensaio para a caracterização dos mástiques betuminosos. Assim, foram utilizados neste trabalho métodos de ensaio não normalizados e métodos de ensaio normalizados mas apenas no âmbito da caracterização dos betumes, realizando-se, sempre que necessário, alterações para atender ao comportamento particular do mástique betuminoso.

Por forma a estudar o comportamento dos mástiques betuminosos, foram realizados os seguintes ensaios:

- avaliação da viscosidade, com viscosímetro rotativo, segundo a norma EN 13302 (CEN, 2010), cujo âmbito de aplicação é referido na norma como sendo apenas para ligantes betuminosos. Neste ensaio houve a necessidade de estudar não só o tempo de estabilização da temperatura das amostras, dado que a existência de material sólido na amostra afeta a forma como se dão as trocas de calor no fluido, bem como os valores das taxas de corte a aplicar nos ensaios, para atender ao comportamento não Newtoniano do mástique betuminoso, principalmente para os valores de temperatura mais baixos;
- apesar do envelhecimento do mástique betuminoso não ser um problema que deva ser considerado no estudo das misturas betuminosas, uma vez que o envelhecimento da mistura se deve quase exclusivamente ao envelhecimento do betume, foram realizados ensaios de envelhecimento do mástique betuminoso. Procurou-se, deste modo, avaliar de que forma o filler presente no mástique interfere no processo de envelhecimento do betume. Esta avaliação foi estabelecida através da realização de ensaios de temperatura anel e bola, segundo a norma EN 1427 (CEN, 2015), para vários estados de envelhecimento do mástique betuminoso, envelhecimento esse realizado através da metodologia PAV, segundo a EN 14769 (CEN, 2012) para uma temperatura de 100 °C;
- quantificação das características reológicas do mástique através de ensaios com reómetro de corte dinâmico, segundo a norma EN 14770 (CEN, 2012), adaptando o valor da tensão de corte máxima a aplicar às amostras, atendendo à resposta dinâmica de cada um dos mástiques;
- avaliação da adesão entre o betume e o agregado bem como entre o mástique betuminoso e o agregado, através de ensaios de tração direta, do tipo “*pull-off*”. Este ensaio ainda não se encontra normalizado quer para a utilização em betumes quer

para a utilização em mástiques, sendo a técnica utilizada nos ensaios realizados apresentada de seguida.

Existem muitas metodologias normalizadas para avaliar não só a suscetibilidade à água das misturas betuminosas, mas também a adesão do betume ao agregado. Em todos esses ensaios, as amostras são constituídas ou por misturas betuminosas ou pela adição do betume a uma fração granulométrica específica do agregado, e nenhum deles se adequa a ser utilizado para o estudo do mástique betuminoso. Estes métodos, uma vez que envolvem misturas betuminosas ou misturas de agregados com betume, são referidos no capítulo 5.

Na área da engenharia dos materiais, são usualmente realizados ensaios de destacamento ou de arrancamento do tipo “*pull-off*”, como forma de avaliar a adesão entre um material ou revestimento e a respetiva base de aplicação.

Em 2014, Cui *et al.*, realizaram ensaios de destacamento para vários tipos de betumes, utilizando rochas graníticas, calcárias e mármore, tendo os autores concluído da adequabilidade da metodologia, na previsão da adesão entre os materiais.

Alguns exemplos da utilização dos ensaios tipo “*pull-off*” são as avaliações que se realizam de rebocos sobre alvenarias, revestimentos cerâmicos ou afins sobre bases de assentamento, tintas, vernizes ou membranas sobre superfícies cimentícias ou outras.

O programa SHRP procurou desenvolver um procedimento para avaliar a adesão que se estabelece na interface entre o betume e os agregados através destas metodologias existentes, adaptando-as à especificidade dos materiais em presença: betume e agregado. O método desenvolvido baseou-se no descrito no anexo A4 da norma ASTM D4541-02 (2002), cuja metodologia descrita se destina a ensaios em revestimentos, sendo o âmbito da norma as tintas, os vernizes e produtos afins. O programa desenvolveu, então, um equipamento (figura 4.9), capaz de aplicar numa peça metálica de secção circular, uma força de tração, gradualmente crescente.

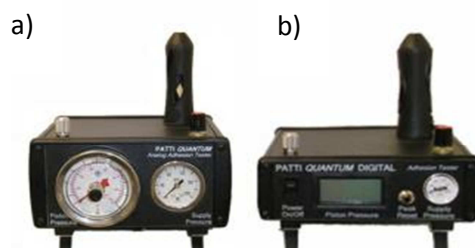


Figura 4.9 Equipamento pneumático para ensaios “*pull-off*”: a) modelo analógico b) modelo digital (<http://semicro.org/collections/patti>)

Nessa peça é colocado o betume, sendo o conjunto pressionado sobre a rocha de ensaio. Após um determinado tempo, e para condições de cura especificadas, procede-se então ao arranque da peça através do referido equipamento, capaz de medir a força máxima aplicada durante o ensaio. O resultado do ensaio é expresso em termos de tensão de arranque, obtida pelo cociente entre a força registada pelo equipamento e a secção da peça metálica.

A grande adaptação que é necessário realizar para atender à especificidade do betume, verifica-se na configuração da peça metálica (figura 4.10). Esta peça foi desenhada de modo a definir uma determinada espessura do provete de betume, que deve ser mantida constante em todos os ensaios, pois o seu valor influencia significativamente os resultados obtidos nos ensaios. Este ensaio permite quantificar um valor da adesividade entre o ligante e o agregado, nomeadamente a componente química da adesão, dado que a metodologia elimina, ou pelo menos minimiza, todas as outras variáveis que interferem na adesão, como sejam a forma e a textura superficial dos agregados. A configuração de todo o equipamento necessário é apresentada na figura 4.11.



Figura 4.10 Peça para arranque utilizada em ensaios “pull-off” de betumes, adaptado de AASHTO, 2011



Figura 4.11 Configuração de todo o equipamento necessário para os ensaios “pull-off” de betumes, adaptado de AASHTO, 2011

Após o arranque da peça metálica, não só é possível obter a tensão de arranque, mas também avaliar de que forma se deu a rotura: adesiva, quando é pequena a quantidade de ligante aderido à superfície da rocha, ou coesiva, quando se verifica que a superfície da rocha se mantém revestida com o ligante.

Neste trabalho, os ensaios “*pull-off*” não foram realizados com este tipo de equipamento, mas sim com um equipamento hidráulico, previsto no anexo A5 da referida norma ASTM D4541-02 (2002), apresentado na figura 4.12.

Como as peças metálicas de arranque que acompanham este equipamento não são adequadas à realização de ensaios com betume, houve a necessidade de desenvolver, especificamente para os ensaios realizados no âmbito deste trabalho, uma nova configuração para as peças metálicas. Estas peças foram concebidas de modo a ser possível utilizar o dispositivo de arranque do equipamento e serem capazes de assegurar uma espessura de betume constante em todos os ensaios. Foram assim produzidas 12 peças em alumínio, em torno mecânico, assegurando, assim, a realização de 4 ensaios em simultâneo, garantindo a execução de três provetes por ensaio.

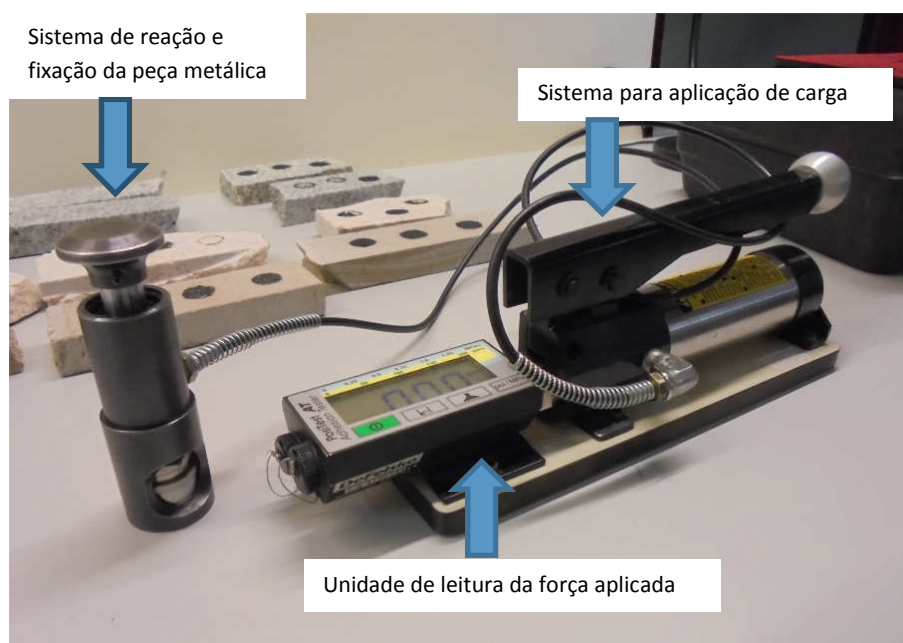


Figura 4.12 Equipamento hidráulico utilizado nos ensaios “*pull-off*” realizados neste trabalho

Essas peças, representadas na figura 4.13, possuem uma base com um diâmetro externo de 20 mm, onde se localiza uma zona central rebaixada, com 18 mm de diâmetro e 0,8 mm de altura. Possui, ainda, quatro caneluras na parede que faz a

contenção da amostra de betume, capazes de permitir a saída do ligante em excesso durante a sua fixação à amostra de rocha, garantido um provete de ligante de forma cilíndrica, com as dimensões do rebaixo.



Figura 4.13 Peça metálica utilizada nos ensaios “pull-off” realizados neste trabalho

Nos ensaios foi utilizada a metodologia prevista no projeto de norma AASHTO de 2011, exceto no que diz respeito à temperatura de aplicação do ligante. Na realidade, o projeto de norma prevê que a fixação da peça metálica à superfície da pedra seja realizada à temperatura de fabrico da mistura betuminosa, ou seja, todos os elementos, placa de pedra, peça metálica e ligante devem estar todos a uma temperatura próxima de 150 °C o que se veio a mostrar não adequado, pois o ligante a essa temperatura apresenta-se muito pouco viscoso, libertando-se pelas canceluras existentes, não permitindo garantir uma espessura constante do ligante. No estudo optou-se por realizar a fixação com o ligante à temperatura ambiente e a placa de rocha e peça metálica a 60 °C de temperatura.

O procedimento de ensaio proposto neste trabalho, foi estabelecido tendo em conta igualmente as considerações feitas por vários autores (Miller *et al.*, 2010; Miller 2012 e Greyling 2012) que refletem a realização de ensaios de tração direta aplicados a emulsões.

Foram preparadas placas por serragem e polimento, com 2 a 3 cm de espessura, de 6 amostras de rocha provenientes de pedreiras onde foram produzidos os agregados 0/4 que deram origem a 6 fileres recuperados: FRC1, FRC5, FRC6, FRG1, FRG3 e FRG5.

Apesar de a metodologia prever a realização do ensaio apenas para o ligante, foram desenvolvidos procedimentos no sentido de realizar ensaios também para mástiques, procurando, assim, estudar a adesão do mástique ao agregado. Todos os mástiques foram produzidos para uma relação volumétrica filer/mástique de 0,2. Os ensaios foram realizados para as seguintes amostras:

- betume 35/50;
- betume PMB 45/80-60;
- mástiques produzidos com o betume 35/50 e com os fileres FC1, Chca, Chda, Cem e para o filer recuperado correspondente a cada amostra de rocha;
- mástiques produzidos com o betume PMB 45/80-60 e com os fileres FC1 e Chda.

De modo a avaliar o efeito da água na adesão entre o mástique e a rocha, foram realizados ensaios para duas situações distintas de acondicionamento prévio dos provetes:

- ensaios realizados 24 h após a moldagem dos provetes, com conservação ao ar;
- ensaios realizados em provetes conservados ao ar durante 24 h, seguido de imersão em água a uma temperatura de 40 °C.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados são apresentados no capítulo 6.

4.5. Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi referida a importância do comportamento do mástique betuminoso, nomeadamente no que diz respeito aos fenómenos de adesão entre o mástique betuminoso e o agregado. São apresentadas e analisadas de forma detalhada as diferentes teorias existentes para explicar os fenómenos da adesão e da coesão entre os materiais ligados.

As patologias mais precoces num pavimento são normalmente devidas à presença de água e manifestam-se sobre a forma de rodeiras e fendilhamento, dado a diminuição da resistência das misturas betuminosas, e desprendimentos e covas pela perda de adesão entre os componentes da mistura betuminosa da camada de desgaste.

Estes danos originam superfícies irregulares, buracos, perda de capacidade estrutural, quer por enfraquecimento das misturas, quer por diminuição da espessura, fendilhamentos e suscetibilidade a ciclos gelo/degelo. Muitos destes efeitos são devidos à diminuição da adesividade ou perda de adesão mástique/agregado pela interposição da água entre o filme de mástique e o agregado.

As causas geralmente associadas a misturas suscetíveis a danos devidos à presença de água, são:

- agregados com baixa adesividade ao betume;

- betume com baixa adesividade ao agregado;
- utilização de betume e agregado incompatíveis;
- formulação com baixa percentagem em betume e granulometrias abertas;
- pequena espessura do filme de betume;
- fraca compactação da mistura betuminosa e portanto elevada porosidade;
- drenagem inadequada;
- agregados finos argilosos e pó na superfície dos agregados;
- agregados húmidos;
- mistura betuminosa segregada;
- utilização de aditivos higroscópicos como por exemplo as fibras celulósicas.

No capítulo é, também, abordado o comportamento do mástique betuminoso em termos da sua viscosidade e comportamento reológico, função da concentração do filer no mástique, e são apresentados as teorias associadas aos fenómenos que ocorrem quer no filer quer no betume quando os dois materiais são postos em contacto na obtenção do mástique betuminoso.

Por fim, descreve-se uma metodologia de ensaio para avaliar laboratorialmente a adesão do mástique ao agregado, nomeadamente a componente química da adesão. Esta metodologia foi utilizada por Moraes *et al.*, em 2010, tendo os autores concluído, através dos resultados obtidos, que o ensaio permite distinguir diferentes betumes e fileres utilizados no fabrico dos mástiques ensaiados. Também Copeland, em 2007, utilizou ensaios BBS para prever o efeito da água na adesão mástique/agregado, fazendo variar o tempo de imersão dos provetes em água.

O número de ensaios e o tipo de amostras seleccionadas para realizar os ensaios, foram estabelecidos com base nos resultados obtidos nos ensaios de viscosidade e de rigidez e também de acordo com as conclusões obtidas por Hunter & Ksaibati em 2002, em que defendem que a origem e características do agregado influenciam mais a adesividade do que propriamente a origem do betume.

5

MISTURAS BETUMINOSAS

5.1. Introdução

As misturas betuminosas utilizadas nos pavimentos flexíveis em camadas de base, regularização, ligação e de desgaste, são, de uma forma genérica, constituídas por uma mistura de agregados de diferentes granulometrias, filer e um ligante betuminoso.

Este capítulo versa sobre a caracterização laboratorial das misturas betuminosas fabricadas a quente, aquelas em que o ligante betuminoso é um betume.

O betume ocupa na mistura betuminosa uma percentagem em peso de cerca de 4,5 a 7,0%, a que corresponde uma percentagem em volume entre 10 a 20%, e representa na mistura betuminosa a fase viscoelástica, enquanto que os agregados representam a fase elástica da mistura betuminosa. Assim, quanto maior a percentagem em betume de uma mistura betuminosa maior será a suscetibilidade da mistura às deformações viscosas, irrecuperáveis e permanentes, ou seja, à formação de rodeiras no pavimento. Por outro lado, o aumento da dosagem de betume conduz a uma mistura betuminosa de menor rigidez, mas por essa razão também com um melhor comportamento à fadiga e melhor desempenho no que diz respeito ao aparecimento de fendas devidas ao tráfego e às variações térmicas.

O betume é o componente da mistura betuminosa que ocupa a quase totalidade dos espaços vazios deixados pela mistura de agregados. Em teoria, se a mistura compactada de agregados e filer produzisse uma mistura sem vazios, seria impossível a produção da mistura betuminosa. Por outro lado, caso o betume ocupasse todos os vazios da mistura compactada de agregados e filer, resultaria uma mistura betuminosa sem vazios, facilitando o movimento dos agregados no meio viscoso constituído pelo mástique betuminoso, o que conduziria não só ao aparecimento de deformações permanentes mas também à exsudação do betume na superfície da camada de mistura betuminosa.

A granulometria dos agregados e do filer deve ser tal, que conduza a uma mistura com um volume de vazios capaz de receber o betume, e resultar depois uma mistura betuminosa com uma porosidade adequada. Os vazios da mistura de agregados e filer deve ser tanto maior, quanto mais elevados os valores da percentagem de betume e da porosidade pretendidos para a mistura betuminosa.

Assim, a quantidade de betume de uma mistura betuminosa deve ser fixada de modo a garantir os requisitos pretendidos para a mistura, mas atendendo igualmente aos seguintes fatores:

- porosidade dos agregados;
- vazios da mistura de agregados;
- espessura do filme de betume pretendida;
- porosidade pretendida para a mistura betuminosa.

No que diz respeito à regulamentação portuguesa, o caderno de encargos do IP,S.A., segue as condições prescritas na norma europeia EN 13108-1 (CEN, 2006) e anexo nacional, começando por impor, para cada tipo de mistura betuminosa, um determinado fuso granulométrico para a mistura de agregados. Para a mistura betuminosa são definidas classes ou valores limites para algumas propriedades da mistura, valores esses que dependem do tipo de mistura betuminosa e da posição que esta ocupa no pavimento.

As propriedades exigidas avaliar para as misturas betuminosas do tipo betão betuminoso AC (*Asphalt Concrete*) e do tipo drenante PA (*Porous Asphalt*), com utilização de betumes de pavimentação ou betumes modificados com polímeros, são apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Propriedades a observar pelas misturas betuminosas do tipo betão betuminoso (AC) e misturas betuminosas drenantes (PA)

Propriedade	Sigla	unidades	Tipo de Mistura Betuminosa	
			AC	PA
Vazios na mistura de agregados	VMA	%	x	x
Percentagem de ligante mínima	B	%	x	x
Porosidade	Vm	%	x	X
Estabilidade Marshall	S	kN	X (1)(3)	(4)
Deformação Marshall	F	mm	X (1) (3)	(4)
Cociente Marshall	Q	kN/mm	X (1) (3)	(4)
Índice de resistência conservada	IRC	%	X (1)(2)	x
Sensibilidade à água	ITSR	%	X (1)	x
Taxa de deformação “ <i>Wheel-tracking</i> ”	WTS _{AIR}	mm/1000 ciclos de carga	X (2)	(4)
Profundidade de rodeira máxima “ <i>Wheel-tracking</i> ”	PRD _{AIR}	%	X (2)	(4)
Permeabilidade “ <i>in situ</i> ” (EN 12697-40)	HC	s ⁻¹	(4)	x
Permeabilidade “ <i>in situ</i> ” (NLT 327)	T	s	(4)	x
Perda de massa (EN 12697-17)	PL	%	(4)	x
Ensaio Cantabro húmido (NLT 362)	P	%	(4)	x

(1) Não aplicável na AC 32,5 base; (2) Não aplicável nas AC 4 bin e reg; (3) Não aplicável na AC 10 surf; (4) Não aplicável

5.2. Ensaio de caracterização de misturas betuminosas

Neste ponto são apresentados os ensaios laboratoriais que permitem quantificar as propriedades das misturas betuminosas que mais fortemente são influenciadas pelas características dos fileres.

Na parte experimental deste estudo foram realizados ensaios para avaliação da coesão de misturas betuminosas abertas, do tipo PA, e a sensibilidade à água de misturas betuminosas densas do tipo AC. Para este tipo de misturas foram ainda quantificados os valores da rigidez, estudado o comportamento à formação de rodeiras e definido o comportamento à fadiga.

5.2.1. Sensibilidade à água e afinidade agregado/betume

A maior parte dos ensaios laboratoriais para prever a sensibilidade à água de uma mistura betuminosa, ou para estudar a maior ou menor compatibilidade na ligação agregado/betume em presença da água, baseiam-se na obtenção de uma relação entre a resistência mecânica obtida em provetes conservados em condições de saturação em água e a mesma resistência mecânica obtida para provetes conservados ao ar. As condições de conservação em água são geralmente muito severas, incluindo a aplicação de determinada pressão de vácuo com os provetes imersos em água, quase que obrigando a um aumento do volume dos poros, por forma a aumentar a superfície acessível à água.

Estes ensaios mecânicos, apesar de utilizados de forma generalizada, não quantificam as propriedades relacionadas com os mecanismos dos materiais e nem sempre apresentam boa correlação com o comportamento da mistura betuminosa no pavimento.

Os procedimentos para a avaliação laboratorial dos estragos provocados pela água a uma mistura betuminosa, em termos da coesão da mistura, devem, a exemplo de qualquer outra avaliação laboratorial, cumprir com determinados requisitos:

- serem exequíveis, ou seja, fáceis de executar, económicos e rápidos, por forma a poderem ser incluídos como métodos para o estudo de formulação da mistura betuminosa bem como no controlo da qualidade em obra;
- apresentar boa repetibilidade e boa reprodutibilidade, de modo que os resultados sejam credíveis e permitam a aprovação ou rejeição de uma mistura betuminosa;
- obter resultados que permitam o estabelecimento de critérios de conformidade, capazes de diferenciar corretamente distintas formulações de misturas betuminosas;
- simular e prever todos os mecanismos que se desenvolvem quando a água consegue atingir a interface agregado/mástique, ou pelo menos, avaliar uma das variáveis que condiciona determinantemente a perda de coesão por efeito da água.

Para além destes quatro aspetos, imprescindíveis para ser corretamente estabelecida uma metodologia de ensaio, é necessário transpor o método para a prática, ou seja, garantir que os pressupostos estabelecidos com os resultados dos ensaios, vão ao encontro do observado no pavimento. Caso contrário, poderá ocorrer a rejeição de misturas betuminosas que na prática apresentam um bom desempenho, ou, situação

ainda mais grave, a aceitação de uma mistura betuminosa que, uma vez aplicada em camada de pavimento, vem demonstrar comportamento deficiente.

Desde há muito, técnicos e investigadores na área dos pavimentos, se preocupam em desenvolver métodos de ensaio para o estudo da sensibilidade à água das misturas betuminosas. Mas desenvolver uma metodologia de ensaio, capaz de prever com exatidão o comportamento de uma mistura betuminosa em presença da água, para as condições de utilização de tráfego, não é uma matéria simples. Mais difícil se torna ainda, transpor os resultados obtidos em laboratório para a mistura betuminosa colocada em camada de um pavimento. Estas dificuldades são devidas às inúmeras variáveis envolvidas e das quais se devem salientar:

- grande variabilidade quanto à origem dos agregados, tanto em termos geológicos como em termos mineralógicos, bem como as diferentes características de textura superficial obtidas nos muitos processos de britagem existentes. Até mesmo, o tempo decorrido entre o processo de transformação da rocha em agregado e a utilização deste produto, pode interferir na forma como este contribui para as características finais da mistura betuminosa;
- várias origens dos crudes, processos industriais de fabrico dos betumes e diversos tipos de modificações, aspetos que conduzem a produtos finais de comportamento muito diversificado;
- diferentes tecnologias nos processos de fabrico das misturas betuminosas e sua colocação na camada do pavimento.

Os métodos desenvolvidos até à data, podem ser agrupados em dois grandes grupos: ensaios realizados em misturas betuminosas não compactadas e ensaios realizados sobre provetes de misturas betuminosas compactadas.

5.2.1.1. Ensaio em misturas betuminosas não compactadas

Neste grupo incluem-se ensaios em que, as ações a aplicar durante o ensaio, sejam térmicas, mecânicas ou ambas, são aplicadas sobre provetes previamente preparados e constituídos pela mistura de um betume com uma mistura de agregados, ou com uma determinada fração do agregado, sem se proceder, no entanto, à compactação da mistura. Os resultados obtidos são em todos os casos qualitativos, muito dependentes do operador, ou seja, pouco repetíveis e reproduzíveis e portanto devem ser utilizados com algumas reservas. Caso os resultados destes ensaios indiquem fraco desempenho,

devem estabelecer-se suspeitas sobre a utilização conjunta dos agregados e betume ensaiados. Contudo, resultados que apontem no sentido de uma boa compatibilidade, não devem ser entendidos como podendo ser utilizados sem reservas e sem outro tipo de validação, pois nem todas as condicionantes são consideradas nestes ensaios. Quer isto dizer que, com os resultados dos ensaios podem ser estabelecidas conclusões quanto à incompatibilidade dos materiais em presença, mas não quanto à sua compatibilidade.

Um aspeto muito importante nestes ensaios é que representa uma desvantagem destes métodos, é o facto de os provetes resultarem, na generalidade dos casos, do envolvimento com betume de apenas uma fração grossa do agregado. Como já referido anteriormente, é muito importante, principalmente nos processos de adesão e coesão, considerar uma mistura betuminosa como a mistura de agregado com mástique betuminoso, dada a importância dos fenómenos que se desenvolvem da interligação do filer com o betume.

Apesar de a literatura (Solaimanian *et al.*, 2003) referenciar uma enorme quantidade de ensaios neste grupo, poucos são os que deram origem a uma metodologia de ensaio normalizada, e para estes será agora realizada uma breve descrição de cada um deles.

5.2.1.1.1. “Net Adsorption Test”

Este método de ensaio, adotado e apresentado por Prowell *et al.*, 2005, no âmbito do programa SHRP, resulta do desenvolvimento de uma metodologia já descrita por Curtis & Jeon em 1988 e por Jamieson *et al.* em 1993, pretende avaliar a afinidade do betume ao agregado, bem como a sensibilidade da mistura à água. Por este motivo, o ensaio compreende duas etapas. Numa primeira fase é colocada uma amostra do agregado numa solução de betume e tolueno, permitindo que durante 6,5 h o betume seja adsorvido pela superfície do agregado, sendo avaliado no final deste período, a quantidade de betume adsorvido, através da medição da concentração do betume na solução. Numa segunda fase é adicionada água à amostra, procurando provocar o desprendimento do betume da superfície do agregado, sendo de seguida quantificado o betume mantido aderido à superfície do agregado.

Curtis & Jeon observaram, através da realização de ensaios de acordo com esta metodologia, que agregados da mesma origem geológica mas de diferentes proveniências, possuem comportamentos distintos quanto à quantidade de betume

adsorvido, bem como, quanto à quantidade de betume removida da superfície do agregado devido à presença da água.

A metodologia de ensaio foi igualmente descrita e utilizada por Curtis *et al.*, em 1933, apresentando o autor resultados obtidos em ensaios realizados, que lhe permitiram concluir que o método apresenta fraca correlação com outros métodos laboratoriais, nomeadamente com ensaios imersos do tipo “*Wheel Tracking*” (*Hamburg Wheel Tracking Device, HWTD*), ensaio que será descrito neste capítulo.

5.2.1.1.2. Método Imersão Estática - “*Static-Immersion Test*”

Este método de ensaio encontrava-se definido nas normas americanas AASHTO T182-84 (1984) e ASTM D1664-85 (1985), entretanto anuladas.

O método consiste em revestir uma amostra de agregado com betume, sendo depois o provete colocado dentro de água à temperatura ambiente, durante 16 a 18 h, sendo no final observada a percentagem de superfície do agregado mantida revestida.

Também o caderno de encargos da ex-JAE (Junta Autónoma de Estradas) previa na sua edição de 1990, um procedimento de ensaio algo semelhante: após o envolvimento do agregado com betume o provete assim obtido era imerso em água por um período de 24 h. Findo este período metade do provete era retirado da água, sendo avaliada a percentagem da superfície do agregado ainda recoberta. A outra metade era mantida imersa e aquecida a uma temperatura de 60 °C durante 3 h. No final procedia-se igualmente à quantificação visual da percentagem de superfície de agregado recoberta pelo betume. O resultado era dado por uma classificação, constituída por cinco níveis, dependendo dos resultados observados nas duas apreciações.

5.2.1.1.3. Método de Ebulição - “*Boiling Water Test*”

Este método de ensaio encontra-se descrito na norma americana ASTM D3625-01 (2001). O procedimento descrito nesta norma preve a preparação de uma amostra resultante de agregado revestido por um betume, sendo então a amostra mantida dentro de água em ebulição por um período de 10 min. A amostra é então colocada a arrefecer e depois de atingida a temperatura ambiente, procede-se à quantificação da percentagem da superfície de agregado ainda revestida.

5.2.1.1.4. Ensaio de Afinidade Agregado/Betume

A norma europeia EN 12697-11 (CEN, 2012) descreve o procedimento para a determinação da afinidade entre o agregado e o betume, através da quantificação visual da superfície de agregado coberta com betume, em percentagem da superfície total de agregado, numa amostra não compactada, após ter sido submetida a uma ação mecânica em presença de água.

Por outro lado, a norma de produto europeia EN 13043 (CEN, 2002), prevê que o ensaio seja realizado sempre que o utilizador do agregado o exija, devendo o produtor declarar o valor obtido. Apesar de a normalização europeia definir o resultado do ensaio como a avaliação da afinidade do agregado a um betume, o ensaio pode também ser usado como ferramenta no estudo de formulação de uma mistura betuminosa no sentido de:

- procurar um betume que apresente uma maior adesividade a um determinado agregado;
- encontrar um agregado que apresente maior adesividade a um determinado betume;
- prever o desempenho de diferentes promotores de adesividade;
- prever a sensibilidade à água da mistura betuminosa.

O método de ensaio prevê a obtenção do provete através do recobrimento com betume das superfícies das partículas de uma dada fração granulométrica do agregado em estudo. São preparados dois provetes que são então imersos em água e sujeitos a uma ação mecânica provocada por agitação (figura 5.1), que obriga as partículas a rolar umas contra as outras, no sentido de provocar o descolamento do betume da superfície do agregado.

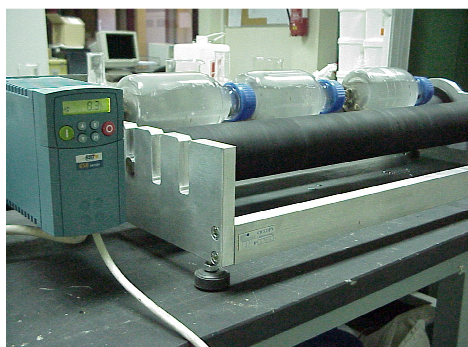


Figura 5.1 Agitador horizontal rotativo utilizado em ensaios de afinidade agregado/betume (Teixeira & Azevedo, 2007)

A quantificação, em percentagem, da superfície ainda coberta com betume, relativamente à superfície total do agregado, é realizada por dois operadores, após 6 e 14 horas de ensaio. O resultado do ensaio consiste em realizar observações visuais, aspeto que torna os valores muito subjetivos, e o facto de o resultado final ser a média de duas observações, realizadas por operadores distintos, em pouco melhora este aspeto. A prová-lo são os valores de repetibilidade e reprodutibilidade apresentados na norma de ensaio, respetivamente de 20 e 30%, valores demasiado elevados para um procedimento normalizado. Na figura 5.2 são apresentados provetes de ensaio após 6 e 24 h de agitação.

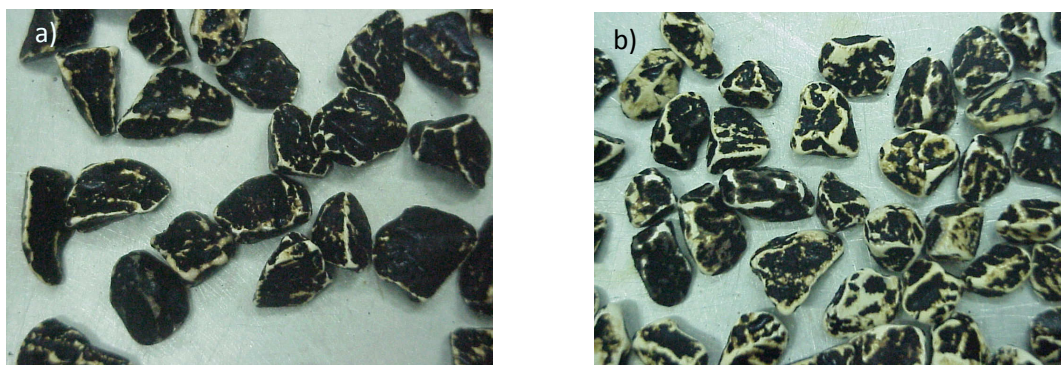


Figura 5.2 Proвете de ensaio de afinidade agregado/betume:
a) após 6 horas de ensaio b) após 24 h de ensaio (Teixeira & Azevedo, 2007)

Ensaio realizados por Teixeira & Azevedo, 2007 com um mesmo agregado mas para diferentes tipos de betume e de diferentes origens, conduziram a resultados significativamente diferentes, pelo que os ensaios devem ser considerados, não para caracterizar o agregado, mas sim para prever a compatibilidade entre o agregado e um determinado betume.

A esta metodologia de ensaio podem ser identificados alguns inconvenientes, para além do já referido quanto aos elevados valores de repetibilidade e reprodutibilidade associados ao ensaio:

- o facto de um determinado agregado sofrer de abrasividade, pode ser determinante para o resultado do ensaio, pois o pó que o agregado vai produzindo ao longo das 24 horas de ensaio, juntamente com a água, vai constituir um abrasivo, acelerando o processo de desprendimento do betume da superfície do agregado. Deveria pois

a norma impor um valor limite superior para a perda de massa do agregado, quantificada após extração do betume da amostra no final do ensaio;

- ensaios de extração do betume do agregado após os ensaios de afinidade, realizados por Pavol *et al.*, em 2011 permitiram concluir que durante o ensaio, o betume, devido à presença da água, tende a tomar a forma de gota, fazendo com que localmente a espessura do filme de betume seja superior, dificultando ainda a leitura da área do agregado não recoberta por betume no final do ensaio;
- agregados de cor escura, como os basaltos ou os dioritos, ou mesmo agregados mais claros mas com minerais constituintes de cor escura, como por exemplo os granitos com biotite, tornam muito difícil a avaliação da superfície do agregado com betume;
- a forma do agregado influencia o resultado do ensaio, dado que superfícies côncavas tendem a depositar mais betume e são superfícies não sujeitas à abrasividade por atrito pelas restantes partículas durante o ensaio. Este aspeto foi comprovado por Teixeira & Azevedo em 2007, pelos resultados bem distintos obtidos para dois agregados com a mesma origem, mas com formas muito diferentes, resultado de dois processos de britagem distintos;
- por outro lado, as elevadas temperaturas a que o agregado está submetido no processo de fabrico das misturas betuminosas a quente, pode conduzir a alterações nas características físicas, e principalmente químicas, da superfície do agregado, que podem influenciar a forma como se dá a adesão do betume ao agregado;
- o método de ensaio considera apenas uma fração granulométrica do agregado. No entanto, um estudo realizado por Jorgensen, em 2005, tornou evidente a existência de diferenças mineralógicas entre as frações fina e grossa do mesmo agregado, aspeto que conduz a características de adesão distintas, para diferentes frações granulométricas de um mesmo agregado.

5.2.1.2. Ensaio em misturas betuminosas compactadas

Todos os ensaios para avaliação da adesão nas misturas betuminosas e do seu comportamento em presença da água, realizados em misturas betuminosas compactadas, prevêm condições ambientais específicas, em termos de temperatura e humidade, quer por acondicionamento prévio dos provetes, quer durante a execução do ensaio.

5.2.1.2.1. Ensaio Imersão/Compressão – “*Imersion/Compression Test*”

Este método de ensaio encontra-se estabelecido nas normas americanas ASTM D1075-11 (2011) e AASHTO T165-06 (2006).

Neste ensaio são preparados provetes cilíndricos de mistura betuminosa e divididos em 2 grupos: os provetes de um dos grupos são ensaiados à compressão, após acondicionamento ao ar a uma temperatura de 25 °C, os provetes do segundo grupo são igualmente ensaiados à compressão, mas após um de dois possíveis acondicionamentos:

- dentro de água, a uma temperatura de 60 °C durante 24 h, seguido de um período de 2 h de imersão em água a 25 °C;
- dentro de água, a 49 °C de temperatura durante 4 dias, seguido igualmente de imersão em água a 25 °C durante 2 h.

O resultado do ensaio é dado pelo cociente entre o valor da tensão de rotura à compressão obtido pela média dos valores individuais para os provetes imersos, e o valor da mesma característica, mas respeitante aos provetes não imersos.

5.2.1.2.2. Ensaio Lottman – “*Lottman Test*”

Esta metodologia de ensaio encontra-se descrita por Solaimanian *et al.*, 2003, sendo o ensaio realizado em provetes cilíndricos, moldados, de mistura betuminosa. Os provetes são inicialmente distribuídos em 3 grupos: um primeiro grupo é conservado ao ar, num segundo grupo os provetes são imersos em água e aplicado vácuo e o terceiro grupo é igualmente imerso em água e aplicado vácuo, mas de seguida é ainda submetido a ciclos de gelo e degelo. As condições de conservação dos segundos e terceiros grupos, pretendem simular o envelhecimento da mistura por períodos de 4 anos e entre 4 e 12 anos, respetivamente. Todos os provetes são ensaiados à rotura por tração por aplicação de um carregamento de compressão diametral. O resultado do ensaio é dado pelo cociente entre os resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral para cada uma das situações de conservação e para a situação secos.

5.2.1.2.3. Ensaio Lottman Modificado – “*Modified Lottman Test*”

O ensaio Lottman modificado encontra-se descrito na norma americana AASHTO T283-03 (2003). Segundo a metodologia de ensaio, são preparados provetes cilíndricos da

mistura betuminosa e estabelecidos dois grupos. Um dos grupos é ensaiado seco, sendo no entanto os provetes impermeabilizados através dum plástico e colocados dentro de água a 25 °C durante 2 h antes do ensaio. O outro grupo de provetes é colocado num recipiente com água e aplicado vácuo por um período de 5 a 10 min. De seguida os provetes são submetidos a uma das seguintes condições: imersos em água a 60 °C durante 24 h ou, em alternativa, submetidos a um ciclo de gelo/degelo. Em qualquer das situações os provetes são ensaiados à rotura, por tração por compressão diametral, a uma temperatura de 25 °C. O resultado do ensaio é dado pela relação entre os resultados obtidos para a situação saturados e para a situação secos.

5.2.1.2.4. Ensaio de Resistência Conservada – “*Marshall Immersion Test*”

O ensaio de avaliação da resistência conservada de uma mistura betuminosa, encontra-se descrito na norma americana MIL-STD-620^a e no Cahier RILEM 17 BM nº 3, conforme referido na publicação APORBET 1998 e consiste em realizar ensaios de rotura Marshall em provetes cilíndricos, após imersão em água a uma temperatura de 60 °C durante 30 min e 24 h. O resultado do ensaio é dado em percentagem e resulta do cociente entre a média das forças de rotura obtidas nos provetes correspondentes ao período de imersão mais prolongado e a média das forças de rotura obtidas nos provetes imersos durante apenas 30 min.

5.2.1.2.5. Ensaio de Sensibilidade à Água – “*Indirect Tensile Strength Ratio*”

O ensaio de sensibilidade à água encontra-se regulamentado como o método A, descrito na norma de ensaio europeia EN 12697-12 (CEN, 2008) e consiste em moldar provetes cilíndricos de mistura betuminosa, constituindo então dois grupos de provetes. Os provetes de um dos grupos são acondicionados ao ar a 20 °C e os provetes do segundo grupo são imersos em água a 20 °C e aplicado vácuo durante 30 min, seguido de um período de 68 a 72 h de imersão em água a 40 °C. Todos os provetes são ensaiados à compressão diametral até se atingir a rotura dos provetes por tração. O resultado do ensaio é dado em percentagem e calculado como, a relação entre o valor médio da tensão de rotura dos provetes imersos, e o valor médio da tensão de rotura dos provetes secos.

A norma europeia EN 13108-1 (CEN, 2006) define categorias de desempenho para esta característica de acordo com a tabela 5.2.

Tabela 5.2 Categorias *ITSR* previstas na EN 13108-1 (CEN, 2006)

Valor mínimo da resistência conservada em tração indireta (%)	Categoria <i>ITSR</i>
90	<i>ITSR</i> ₉₀
80	<i>ITSR</i> ₈₀
70	<i>ITSR</i> ₇₀
60	<i>ITSR</i> ₆₀

Após a publicação da normalização europeia, referente à caracterização das misturas betuminosas, o I.P.,S.A. adotou no seu caderno de encargos (Estradas de Portugal, 2012) esta metodologia para o estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas, alterando no entanto a temperatura de ensaio prevista na norma de 20 para 15°C. No entanto, em Portugal não há ainda grande experiência neste ensaio, não sendo possível estabelecer, para o caso português, uma relação entre o resultado do ensaio e o desempenho da mistura betuminosa no pavimento. Por este motivo foi decidido:

- manter o ensaio de resistência conservada, fixando valores de aceitação para as misturas betuminosas entre 75 e 80%, valor em função do tipo de mistura e da camada que ela ocupa no pavimento;
- não impor, para a generalidade das misturas betuminosas, valores de aceitação quanto ao resultado do ensaio de sensibilidade à água, exigindo apenas que o resultado seja declarado pelo produtor. No entanto foram fixados valores mínimos de *ITSR* de 75 e 65%, respetivamente para misturas betuminosas abertas e misturas betuminosas rugosas, ambas para camada de desgaste e com utilização do betume modificado com alta percentagem de borracha.

Por forma a estudar de que modo o filer contribui para a manutenção da adesão entre o mástique e o agregado, foram neste estudo realizados ensaios de sensibilidade à água, a uma temperatura de 15 °C, para várias misturas betuminosas do tipo AC14 35/50, produzidas com agregados de diferentes origens, dois granitos e um calcário e fazendo variar o tipo de filer utilizado. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no capítulo 6.

5.2.1.2.6. Ensaio Cantabro

O ensaio cantabro é baseado na norma espanhola NLT-362 (CEDEX, 1992) e aplica-se a misturas betuminosas drenantes, fabricadas a quente ou a frio e para agregados com dimensão máxima de 25 mm. A técnica associada consiste basicamente na moldagem de oito provetes Marshall, em que quatro desses provetes são conservados à temperatura de 25 °C durante pelo menos 24 h, e os restantes provetes são imersos em água a uma temperatura de 60 °C, seguindo-se um período de 24 h em estufa ventilada a 25 °C. Todos os provetes são então pesados e submetidos individualmente a uma determinada energia de desgaste na máquina de Los Angeles. No final de 300 voltas os provetes são novamente pesados. O resultado do ensaio é dado, em percentagem, pelo cociente entre a média da perda por desgaste dos provetes imersos e a média da perda por desgaste verificada nos provetes não imersos. Tal como no ensaio anterior, esta metodologia permite caracterizar o comportamento de uma mistura bem definida: mesmos agregados, mesmo betume e mesma composição.

A norma europeia EN 12697-17 (CEN, 2004) apresenta uma metodologia muito idêntica ao ensaio descrito anteriormente, prevendo no entanto a realização do ensaio de desgaste apenas em provetes secos, conservados ao ar, sem imersão prévia em água. Assim, esta metodologia pretende prever, não o efeito da água na mistura betuminosa, mas sim o comportamento à abrasão provocada pelo tráfego nas misturas betuminosas drenantes. O ensaio descrito neste método prevê a moldagem de cinco provetes Marshall, que após pesagem são colocados individualmente na máquina de Los Angeles, sem carga abrasiva, e individualmente submetidos a ensaio, durante 300 voltas. No final, os provetes são novamente pesados, e o resultado do ensaio é dado, pelo valor médio da perda de massa dos provetes, sendo esta obtida pelos cocientes entre a massa perdida e a massa inicial de cada um dos provetes.

De modo a estudar as ligações coesivas e adesivas que se estabelecem entre o mástique e os agregados, foram realizados ensaios Cantabro, quer para provetes secos, quer para provetes previamente saturados em água, para misturas betuminosas do tipo PA12,5 com agregados graníticos, utilizando os betumes 35/50 e PMB 45/80-60, e fazendo variar o tipo de filer utilizado. Os resultados são apresentados no capítulo 6.

Em 2004, Jiménez *et. al.*, utilizaram um método de ensaio semelhante, UCL (*Universal Method for Binder Characterization*), na caracterização da coesão de misturas betuminosas, com introdução de misturas betuminosas fresadas. Este método, desenvolvido por Jiménez, permite avaliar a coesão devida ao mástique, para uma

mistura betuminosa padrão, quantificando a resistência à abrasão segundo o método Cantabro.

Também Bianchetto *et al.*, em 2006, utilizaram este método de ensaio, juntamente com a realização de ensaios de corte dinâmico com reômetro de corte, em mástiques betuminosos, para avaliar o desempenho de misturas betuminosas, com a utilização de dois tipos de fileres distintos: cal hidratada e filer comercial calcário.

5.2.1.2.7. Ensaio Duriez

Esta metodologia encontra-se descrita no método B da norma europeia EN 12697-12 (CEN, 2008). O procedimento prevê a realização de ensaios de compressão em provetes de 100 mm de diâmetro, a uma temperatura de 18 °C, sobre dois grupos de provetes distintos, em que um deles é previamente submetido a vácuo e de seguida colocado em água a 18 °C durante 7 dias, e o outro grupo é conservado ao ar. O resultado é calculado como sendo a relação entre os valores das forças de rotura nos provetes submetidos a acondicionamento prévio, e o valor obtido para os provetes sem acondicionamento.

5.2.1.2.8. Ensaio “Wheel Tracking” Imerso – “Hamburg Wheel Tracking Device”

Este ensaio encontra-se normalizado através do método B descrito na norma europeia EN 12697-22 (CEN, 2003) e consiste basicamente em avaliar a profundidade de rodeira observada num provete de mistura betuminosa, mantido imerso em água durante todo o ensaio, provocada pela passagem cíclica de um pneu de borracha carregado.

Hao & Hachiya, 2003 utilizaram nos seus estudos, para além desta metodologia, mais dois ensaios: o ensaio Lottman modificado e o ensaio de resistência conservada. Procuraram com estes ensaios avaliar o desempenho de diferentes agentes promotores da adesividade, em que para além de diferentes aditivos, foram ensaiadas misturas betuminosas com diferentes origens de agregados. Os autores concluíram que os ensaios de “Wheel tracking” imersos apresentam resultados mais diferenciadores, no que diz respeito à utilização de materiais distintos, que os dois outros ensaios utilizados.

Também Kandhal *et al.*, em 1998, concluíram que os resultados dos ensaios realizados segundo esta metodologia, permitem avaliar, corretamente, a suscetibilidade à água das misturas betuminosas.

5.2.2. Avaliação do comportamento mecânico de uma mistura betuminosa

No dimensionamento de um pavimento são quantificados os valores das tensões e extensões de tração máximos, observados nas bases das diferentes camadas das misturas betuminosas. Para obter esses valores, são fixados valores de algumas características das misturas betuminosas constituintes das camadas, nomeadamente a rigidez. Assim, durante o estudo da formulação de uma mistura betuminosa a aplicar numa camada de um pavimento, deve ser quantificado o valor da rigidez da mistura betuminosa, como forma de avaliar o cumprimento dos valores adotados em fase de projeto.

As tensões instaladas numa mistura betuminosa constituinte de uma camada de um pavimento devidas ao tráfego são muito complexas, pelo que se torna difícil de as reproduzir laboratorialmente num só ensaio. Assim, de modo a tornar prático o estudo laboratorial, é normal simplificar o problema, isolando as condições existentes no pavimento, estudando de forma individualizada os fenómenos preponderantes no desempenho da mistura betuminosa.

Desta forma, a previsão laboratorial do comportamento de uma mistura betuminosa no pavimento, no que diz respeito à ruína, é realizada para dois aspetos (Hefer & Little, 2005):

- fendilhamento por fadiga devido às tensões de tração horizontais repetidas causadas pela passagem do tráfego. Este tipo de rotura ocorre para temperaturas médias a baixas, normalmente inferiores a 25 °C;
- deformações permanentes devidas a esforços de compressão e de corte, originados pelos rodados dos veículos, provocando na mistura betuminosa deformações plásticas, não recuperadas. Este tipo de rotura ocorre para temperaturas elevadas em serviço, normalmente consideradas superiores a 50 °C.

5.2.2.1. Rigidez

A rigidez de uma mistura betuminosa varia significativamente com a temperatura e com todas as características da mistura, nomeadamente a porosidade, tipo de agregado, tipo de betume e percentagem em betume da mistura.

A quantificação da rigidez de uma mistura betuminosa em laboratório depende das características dos ensaios:

- tipo de esforço aplicado: flexão, compressão, tração, torção ou corte, com ou sem imposição da recuperação da deformação;
- frequência de aplicação do esforço;
- existência de tempos de repouso entre esforços sucessivos.

Quando nos ensaios laboratoriais são utilizados esforços de corte, o valor obtido para a relação entre as tensões e as extensões é designado não por rigidez mas por módulo de corte complexo (G^*). Geralmente as misturas betuminosas são consideradas materiais isotrópicos, pelo que a rigidez, ou módulo de rigidez complexo é obtido a partir da seguinte expressão:

$$|E^*| = 2 |G^*| (1 + \nu) \quad [5.1]$$

Em que:

ν – Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson de uma mistura betuminosa é entendido como a relação entre as extensões transversais e longitudinais, e varia de forma pouco significativa quer com o tipo de mistura betuminosa, quer com a temperatura, não sendo usual a sua determinação laboratorial, utilizando-se geralmente os valores 0,35 para temperaturas médias e baixas e 0,5 para temperaturas altas.

Existem várias metodologias para avaliar laboratorialmente a rigidez de uma mistura betuminosa. A norma europeia EN 12697-26 (CEN, 2012) prevê diferentes metodologias para a quantificação desta característica:

- no anexo A é apresentado um ensaio de flexão, através de carregamento cíclico, em dois pontos, em provetes de forma trapezoidal ou prismática;
- o anexo B define um ensaio de flexão, através de carregamento cíclico, em três pontos, em provete prismático e em quatro pontos, igualmente em provete prismático;
- no anexo C encontra-se descrito um método de ensaio de tração indireta, através de um carregamento pulsatório, de compressão, em duas geratrizes, diametralmente opostas, de um provete cilíndrico;
- o anexo D apresenta um ensaio de aplicação de esforços de tração direta e de compressão direta, cíclicos, por utilização de provetes cilíndricos;

- o anexo E descreve um ensaio de tração direta, em provetes cilíndricos ou prismáticos;
- anexo F define um ensaio de tração indireta, cíclico, em provetes cilíndricos.

A norma europeia EN 13108-1 (CEN, 2006) prevê categorias para os valores da rigidez mínimos e máximos, a observar pelas misturas betuminosas (Tabela 5.3), devendo o projeto definir a classe pretendida para as misturas betuminosas a aplicar nas diferentes camadas do pavimento.

Tabela 5.3 Categorias da rigidez de misturas betuminosas, adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)

Valor mínimo da rigidez (MPa)	Categoria S_{min}	Valor máximo da rigidez (MPa)	Categoria S_{max}
21 000	S_{min} 21 000	30 000	S_{max} 30 000
17 000	S_{min} 17 000	25 000	S_{max} 25 000
14 000	S_{min} 14 000	21 000	S_{max} 21 000
11 000	S_{min} 11 000	17 000	S_{max} 17 000
9 000	S_{min} 9 000	14 000	S_{max} 14 000
7 000	S_{min} 7 000	11 000	S_{max} 11 000
5 500	S_{min} 5 500	9 000	S_{max} 9 000
4 500	S_{min} 4 500	7 000	S_{max} 7 000
3 600	S_{min} 3 600		
2 800	S_{min} 2 800		
2 200	S_{min} 2 200		
1 800	S_{min} 1 800		
1 500	S_{min} 1 500		

De seguida são abordados os dois métodos utilizados em Portugal, tração indireta e flexão em quatro pontos, dando maior relevo a esta última metodologia, pois representa o ensaio com maior implementação em Portugal.

5.2.2.1.1. Tração indireta

Esta metodologia de ensaio encontra-se descrita no Anexo C da norma europeia EN 12697-26 (CEN, 2012) e nas normas americanas AASHTO TP31-96 (1996) e ASTM D7369-11 (2011). O ensaio pode ser realizado a diferentes temperaturas, por aplicação

de cargas repetidas em equipamento apropriado, segundo duas geratrizes diametralmente opostas de um provete cilindro (figura 5.3).

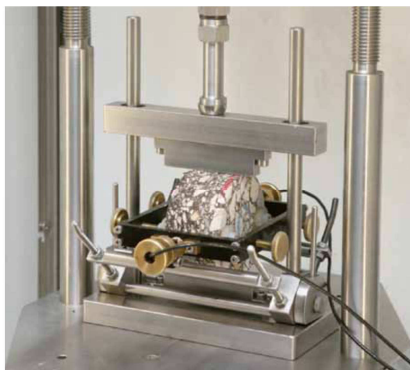


Figura 5.3 Equipamento para a realização do ensaio de tração indireta (Galán *et al.*, 2012)

Segundo a metodologia europeia, o carregamento é do tipo pulsatório e o tempo para aplicação de carga é de 124 ms. Entre cada período de aplicação de carga existe um período de repouso, pelo que o ensaio não permite a quantificação do ângulo de fase. No total, a duração do carregamento e do período de repouso deve prefazer 3 s (figura 5.4). A carga máxima a aplicar ao provete deve ser ajustada, com base na deformabilidade da mistura betuminosa, por forma a que se verifique uma deformação horizontal máxima de cerca de 0,005% do valor do diâmetro do provete, ou seja, aproximadamente 5 μm para provetes cilíndricos com cerca de 100 mm de diâmetro.

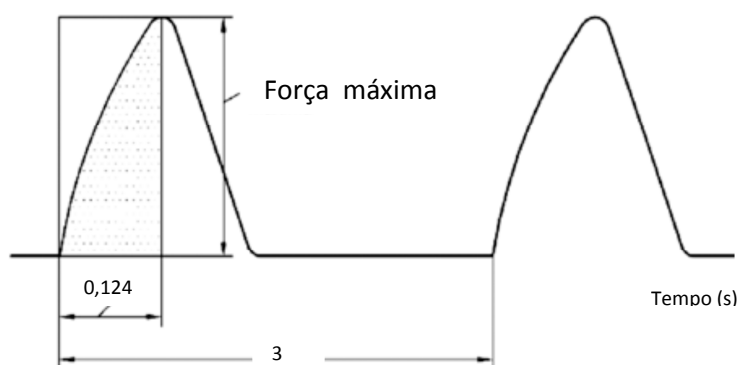


Figura 5.4 Esquema do carregamento aplicado no ensaio de avaliação da rigidez pelo método tração indireta EN 12697-26 (CEN, 2012)

São realizados dois ensaios no mesmo provete, segundo dois planos ortogonais entre si, sendo o resultado final do valor da rigidez da mistura betuminosa dado pela média dos valores obtidos nos dois ensaios.

Quanto ao valor da rigidez de uma mistura betuminosa $|E^*|$, deve ser calculado através das leituras observadas da força e da deformação horizontal respetiva, a cada 5 carregamentos, de acordo com a expressão 5.2.

$$|E^*| = \frac{F_{\text{máx}} (v+0,27)}{z h} \quad [5.2]$$

Em que:

$F_{\text{máx}}$ – É o valor máximo da força vertical aplicada (N);

z – É o valor da amplitude da deformação horizontal obtida durante o carregamento (mm);

h – É a espessura média do provete (mm).

5.2.2.1.2. Ensaio de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos

A avaliação da rigidez das misturas betuminosas pode ser realizada através do anexo B da norma europeia EN 12697-26 (CEN 2012). O ensaio consiste basicamente na aplicação de um carregamento vertical, sinusoidal (figura 2.9), num provete prismático, tal como representado na figura 5.5.

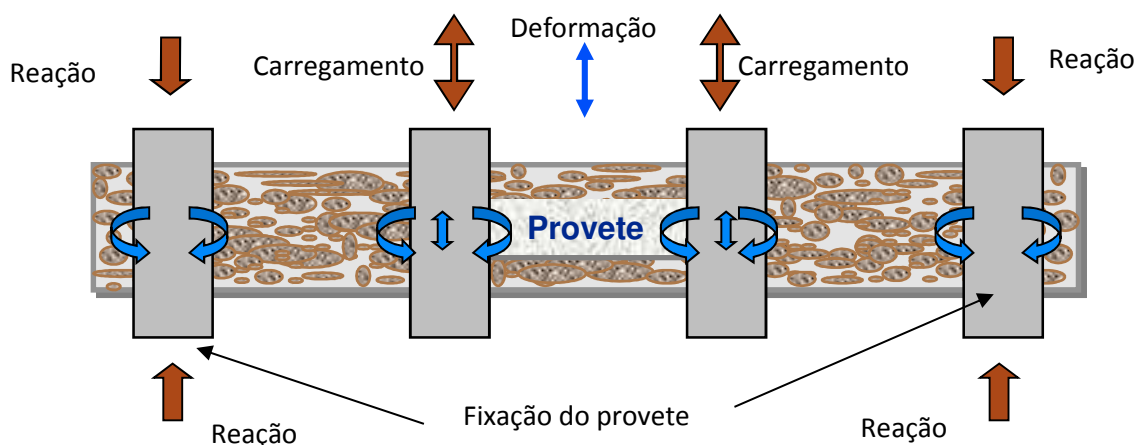


Figura 5.5 Esquema de carregamento do ensaio de flexão em quatro pontos, segundo Teixeira (2000)

Para esta metodologia, os valores das tensões de tração, das respectivas extensões e do ângulo de fase, são obtidos através das expressões [5.3], [5.4] e [5.5].

$$\sigma = \frac{3000 a F}{w h^2} \quad [5.3]$$

$$\varepsilon = \frac{12 d h}{23 a^2} \quad [5.4]$$

$$\emptyset = 360 f s \quad [5.5]$$

em que:

a – Um terço do vão da viga (mm);

F – Força aplicada ao provete (N);

w – Largura da viga (mm);

h – Altura da viga (mm);

d – Deformação vertical no centro da viga devida à carga P (mm);

f – Frequência do carregamento (Hz);

s – tempo decorrido entre a tensão máxima e a extensão máxima (s).

Neste trabalho, os ensaios de avaliação da rigidez das misturas betuminosas estudadas, foram realizados segundo esta metodologia, em provetes prismáticos, obtidos por serragem de placas moldadas em laboratório, para as seguintes condições de ensaio:

- quatro provetes, sendo a rigidez e o ângulo de fase de uma determinada mistura betuminosa calculados como o valor médio dos valores obtidos nos quatro provetes ensaiados;
- três valores de temperatura distintos: 10, 20 e 30 °C;
- quatro níveis de frequência de aplicação de carga de 1, 5, 8 e 10 Hz;
- carregamento sinusoidal, sem período de repouso, com extensão de tração máxima controlada para um valor de 100 µε;

- foram considerados como rigidez e ângulo de fase do provete, os valores observados ao centésimo ciclo da carga.

De salientar que o valor da extensão máxima adotado nos ensaios é metade do valor definido na norma de ensaio de 200 $\mu\epsilon$. Procurou-se desta forma reduzir os danos provocados pelo carregamento sobre os provetes, por forma a utilizar os mesmos provetes nos ensaios a diferentes temperaturas, anulando assim possíveis dispersões de resultados devidos a amostragem. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados no capítulo 6.

5.2.2.2. Fadiga

A passagem repetida do tráfego sobre o pavimento provoca às misturas betuminosas constituintes das várias camadas do pavimento, estados de tensão que conduzem à fadiga dos materiais. A fadiga é caracterizada pela diminuição da rigidez da mistura betuminosa, devida ao efeito dinâmico e repetido das ações do tráfego, e também das variações de temperatura (Azevedo, 1993). Por forma a estudar o desempenho de uma determinada mistura betuminosa à fadiga provocada pela ação dinâmica do tráfego, existem diversos métodos de ensaio. Estes métodos envolvem uma grande variedade de técnicas de ensaio, configurações, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos para a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios.

Existem diferentes documentos normativos para avaliação do comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa: AASHTO TP8-94 (1994), ASTM D7460-10 (2010) e EN 12697-24 (CEN, 2012). A norma europeia prevê diferentes metodologias para a quantificação desta característica:

- o anexo A define um ensaio de flexão, por aplicação de um carregamento cíclico, em dois pontos, em provetes trapezoidais;
- no anexo B encontra-se descrito um outro ensaio de flexão, através de um carregamento cíclico, em dois pontos, em provetes prismáticos;
- o anexo C define mais um ensaio de flexão, por carregamento cíclico em três pontos em provetes prismáticos;
- no anexo D é apresentado um ensaio de flexão, através de carregamento cíclico, em quatro pontos, em provetes prismáticos;
- por fim, no anexo E é apresentado um ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos.

Todos estes ensaios consistem em aplicar a provetes moldados em laboratório, ou serrados, do pavimento ou de placas produzidas em laboratório, diferentes valores de tensão máxima de tração (para ensaios em tensão controlada), ou extensão máxima de tração (para ensaios em extensão controlada), sendo esta última a metodologia usualmente considerada.

No caso do ensaio de flexão em quatro pontos (anexo D da norma de ensaio), o carregamento cíclico é prolongado até que se verifique a ruína do provete, convencionalmente considerada quando se observa uma diminuição da rigidez para metade do valor inicial. Já para o ensaio de tração indireta (anexo E da norma de ensaio), o carregamento pulsatório aplicado deve ser prolongado até que se verifique a fratura do provete, identificada pelo elevado valor da deformação horizontal do provete. Em Portugal, são estes os métodos implementados nos laboratórios de ensaio, sendo no entanto mais comum, para o estudo da fadiga, a utilização do ensaio de flexão. Na realidade, o ensaio de tração indireta ao não impor a recuperação total da deformação (figura 5.6), tem como consequência a acumulação de deformações não recuperadas, aspeto que, não só não permite quantificar o ângulo de fase, como dificulta a interpretação dos resultados obtidos nos ensaios. Por outro lado, esta metodologia apresenta maior dispersão de resultados que o ensaio de flexão em quatro pontos (Palha *et al.*, 2009).

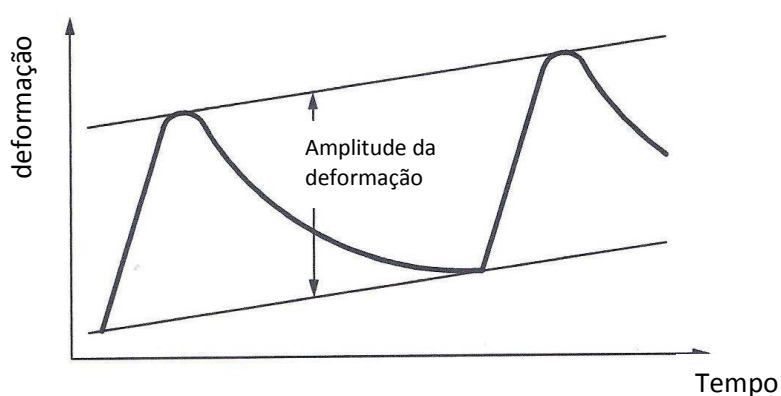


Figura 5.6 Esquema de carregamento pulsatório no ensaio de fadiga de uma mistura betuminosa em tração indireta, adaptado de EN 12697-26 (CEN, 2012)

O resultado do ensaio é geralmente apresentado num gráfico, em escala bi-logarítmica, em que no eixo das abcissas é registado o número de ciclos observados até à ruína do provete, e no eixo das ordenadas é adotado o valor da extensão imposta para o carregamento.

Ao comportamento observado graficamente (figura 5.7) é dado o nome de lei de fadiga, e a reta que exprime este comportamento é obtida através da expressão 5.6 ou pela expressão 5.7 que lhe é equivalente.

$$\lg(N_f) = k + n \lg(\varepsilon_0) \quad [5.6]$$

$$N_f = k \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^n \quad [5.7]$$

Em que:

N_f – Número de ciclos de carga;

k, n – Constantes características da mistura betuminosa;

ε_0 – Extensão máxima de tração (em micro-extensões).

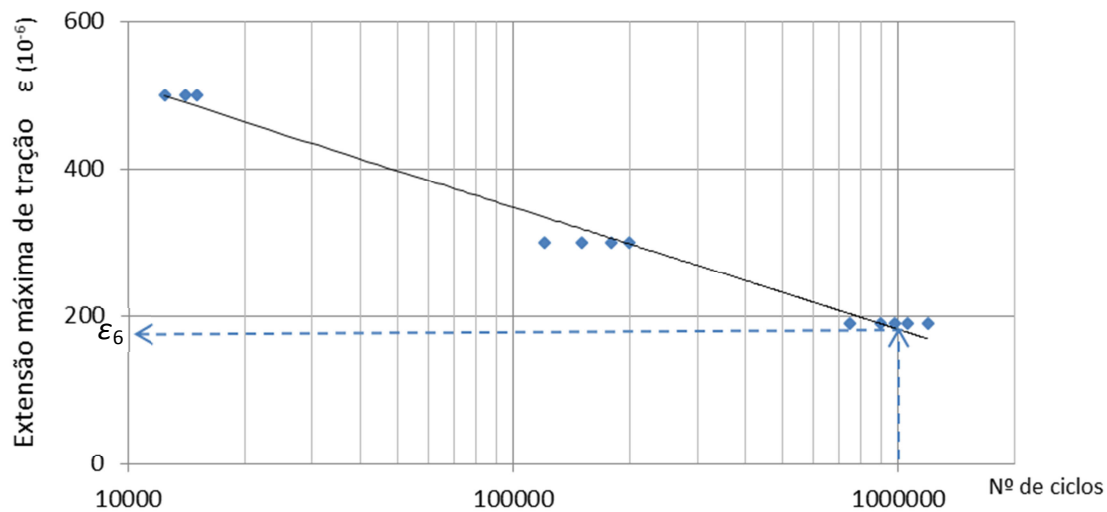


Figura 5.7 Lei de fadiga de uma mistura betuminosa

Na tabela 5.4 são apresentadas as categorias relativas à resistência à fadiga a observar pelas misturas betuminosas, definidas na norma europeia EN 13108-1 (CEN, 2006), devendo o projeto referenciar as classes pretendidas para as diferentes misturas a aplicar nas diversas camadas do pavimento.

As categorias são definidas através do parâmetro ε_6 , representado na figura 5.7, que expressa a extensão para a qual se verifica a ruína da mistura betuminosa, ao fim de um milhão de ciclos de carregamento.

Neste trabalho o comportamento à fadiga das diferentes misturas betuminosas foi realizado segundo a metodologia definida no anexo D da norma europeia, ensaios de flexão em quatro pontos, em equipamento servo-pneumático, representado na figura 5.8.

Tabela 5.4 Categorias da resistência à fadiga de misturas betuminosas, adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)

Resistência à fadiga ($\times 10^{-6}$)	Categoria ϵ_6
310	ϵ_{6-310}
260	ϵ_{6-260}
220	ϵ_{6-220}
190	ϵ_{6-190}
160	ϵ_{6-160}
130	ϵ_{6-130}
115	ϵ_{6-115}
100	ϵ_{6-100}
90	ϵ_{6-90}
80	ϵ_{6-80}
70	ϵ_{6-70}
60	ϵ_{6-60}
50	ϵ_{6-50}

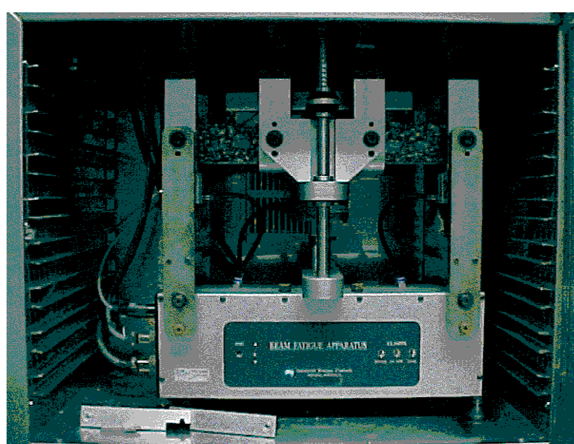


Figura 5.8 Equipamento servo-pneumático para aplicação de um carregamento cíclico em quatro pontos (Teixeira, 2000)

Nos ensaios foram definidas as seguintes condições:

- temperatura 20 °C;
- extensão controlada para três níveis de extensão: 500, 300 e 190 $\mu\epsilon$;
- frequência: 10 Hz (valor máximo permitido pelo equipamento pneumático utilizado nos ensaios).

Os resultados obtidos nos ensaios realizados são apresentados no capítulo 6.

5.2.2.3. Deformações permanentes

A avaliação laboratorial do desempenho das misturas betuminosas no que diz respeito à suscetibilidade à formação de rodeiras, pode ser realizada de acordo com o previsto nas normas europeias: EN 12697-25 (CEN, 2005), que prevê a aplicação de um carregamento de compressão uniaxial e a EN 12697-22 (CEN, 2003), na qual o carregamento do provete é realizado através da utilização de uma carga rolante (*wheel tracking*).

5.2.2.3.1. Carregamento uniaxial

A norma EN 12697-25 (CEN, 2005), contempla duas metodologias de ensaio:

- o método A define um carregamento de compressão uniaxial, cíclico, com um pequeno confinamento lateral, garantido pelo facto de um dos pratos de aplicação da carga ser de diâmetro inferior ao diâmetro do provete de ensaio;
- o método B define igualmente um carregamento axial de compressão, cíclico, com confinamento lateral, materializado pela utilização de uma tensão radial aplicada sobre a superfície de revolução do provete cilíndrico.

Em ambas as metodologias, o desempenho da mistura betuminosa à formação de rodeiras é avaliado pelos valores obtidos da extensão vertical acumulada e da taxa de deformação, observados ao longo do período do carregamento.

5.2.2.3.2. Ensaio “*Wheel Tracking*”

O ensaio “*wheel tracking*”, ou ensaio de pista, encontra-se normalizado na EN 12697-22 (CEN, 2003), que contempla quatro metodologias distintas:

- equipamento de médias dimensões;

- equipamento de grandes dimensões;
- equipamento de pequenas dimensões. Para este tipo de equipamento são definidos dois métodos, A e B, diferindo as metodologias apenas em algumas características do carregamento. Refira-se ainda que o método B pode ser realizado com os provetes acondicionados ao ar ou imersos em água.

Em Portugal generalizou-se a utilização do método B ao ar, que consiste na aplicação de um carregamento de vai e vem, sobre um provete mantido em condições de temperatura controlada (figura 5.9).



Figura 5.9 Equipamento “Wheel tracking” (www.taiseint.com/principle/cooper)

Os provetes, de forma prismática ou cilíndrica, podem ser moldados em laboratório ou obtidos por serragem de placas extraídas do pavimento ou moldadas em laboratório. Sobre a superfície do provete é colocado um pneu de borracha maciça, com uma carga total de 700 N, ao qual é imposto um movimento de vai e vem, com uma frequência de 0,44 Hz e com uma amplitude de 230 mm. O ensaio consiste na aplicação de 10 000 ciclos de carga, realizando o equipamento registos da profundidade da rodeira por cada ciclo de carga aplicado, que permitem obter não só a configuração da rodeira que vai sendo formada pela passagem do pneu, mas também, estabelecer um gráfico (figura 5.10) que evidencia o desenvolvimento da deformação plástica sofrida pela mistura betuminosa, em função do número de ciclos de carga aplicados.

Os resultados do ensaio, definidos pela média de dois provetes, são dados por três características:

- profundidade de rodeira RD_{AIR} . Profundidade média da rodeira obtida ao fim de dez mil ciclos de ensaio;
- percentagem de profundidade de rodeira PRD_{AIR} . Valor obtido pelo cociente entre a profundidade de rodeira no final do ensaio e a espessura do provete no seu início;

- taxa de deformação WTS_{AIR} . Este valor é obtido dividindo por 3000 a profundidade de rodeira observada apenas nos últimos três mil ciclos do ensaio.

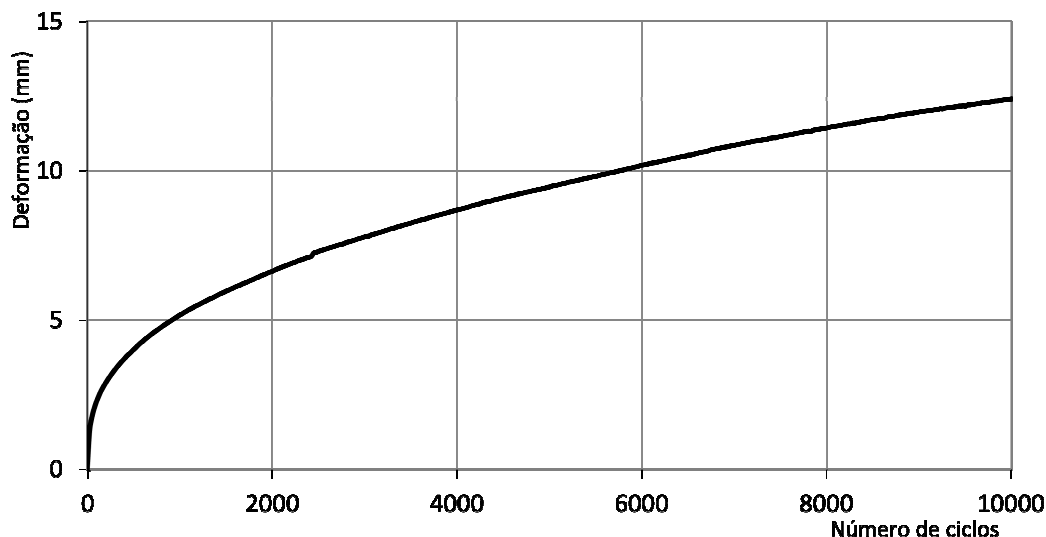


Figura 5.10 Profundidade de rodeira função do número de ciclos de carregamento

Neste trabalho foram realizados ensaios de pista segundo o procedimento B ao ar, para uma temperatura de ensaio de 60 °C, sendo os resultados obtidos apresentados no capítulo 6.

A norma europeia EN 13108-1 (CEN, 2006) prevê categorias para os valores da percentagem de profundidade de rodeira, PRD_{AIR} (tabela 5.5) e para os valores da taxa de deformação, WTS_{AIR} (Tabela 5.6) a observar pelas misturas betuminosas, devendo o projeto definir a classe pretendida para as misturas a aplicar nas diferentes camadas do pavimento.

5.3. Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram descritas as propriedades a observar pelas misturas betuminosas, de acordo com a normalização europeia e segundo os cadernos de encargos das principais concessionárias de estradas de Portugal. Foram apresentadas as metodologias de ensaio associadas à quantificação das propriedades consideradas mais relevantes, no que diz respeito à influência do tipo de mástique incorporado na mistura betuminosa.

Tabela 5.5 Categorias da percentagem de profundidade de rodeira, PRD_{AIR} adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)

Percentagem de profundidade de rodeira (%)	Categoria PRD_{AIR}
1,0	$PRD_{AIR} 1,0$
1,5	$PRD_{AIR} 1,5$
2,0	$PRD_{AIR} 2,0$
3,0	$PRD_{AIR} 3,0$
5,0	$PRD_{AIR} 5,0$
7,0	$PRD_{AIR} 7,0$
9,0	$PRD_{AIR} 9,0$

Tabela 5.6 Categorias da taxa de deformação, WTS_{AIR} , adaptada da EN 13108-1 (CEN, 2006)

Taxa de deformação (mm/10 000 ciclos de carga)	Categoria WTS_{AIR}
0,03	$WTS_{AIR} 0,03$
0,05	$WTS_{AIR} 0,05$
0,07	$WTS_{AIR} 0,07$
0,10	$WTS_{AIR} 0,10$
0,15	$WTS_{AIR} 0,15$
0,30	$WTS_{AIR} 0,30$
0,40	$WTS_{AIR} 0,40$
0,50	$WTS_{AIR} 0,50$
0,60	$WTS_{AIR} 0,60$
0,80	$WTS_{AIR} 0,80$
1,00	$WTS_{AIR} 1,00$

Maior pormenorização foi estabelecida para os métodos de ensaio utilizados na parte experimental deste trabalho, no que diz respeito à avaliação do comportamento em termos da suscetibilidade da mistura betuminosa em presença da água, bem como para a quantificação da rigidez, comportamento à fadiga e às deformações permanentes. Para todos os métodos foram estabelecidos comentários, associando as vantagens e desvantagens de cada uma das diferentes metodologias europeias existentes.

São ainda apresentados os valores associados às categorias propostas na normalização europeia, no que diz respeito às propriedades estudadas nos ensaios laboratoriais realizados.

Por fim, regista-se a existência de um elevado número de metodologias para a avaliação da adesão do betume aos agregados, bem como a grande dificuldade em transpor os resultados obtidos por essas metodologias, para o comportamento das misturas betuminosas no pavimento. De facto, muitos dos resultados obtidos são do tipo qualitativo, e apresentam elevada dependência por parte do operador, registando-se, deste modo, valores de reprodutibilidade e repetibilidade inaceitáveis, para um método de ensaio normalizado.

6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Ensaio em fileres

6.1.1. Introdução

Neste estudo foram utilizados vinte e dois fileres: sete recuperados de granito, referenciados por FRG, seis recuperados de calcário (FRC), um recuperado de riólito (FRR), cinco calcários (FC), uma cal hidratada (Chda), uma cal hidráulica (Chca) e um cimento Portland (Cem).

Procurou-se que as amostras selecionadas fossem representativas dos materiais utilizados em Portugal, quer no que diz respeito à natureza geológica, quer no que toca à distribuição geográfica dos locais de produção dos respetivos agregados.

Os cinco fileres de calcário têm origem na zona centro do país, localizando-se todos eles numa zona com cerca de 20 km de raio, junto à periferia do Parque Nacional da

Serra de Aires e Candeeiros. Esta localização diz respeito a depósitos sedimentares Jurássicos cálcicos.

Os seis fileres recuperados de calcário foram amostrados em centrais de produção de misturas betuminosas, que utilizam agregados finos provenientes de pedreiras localizadas numa faixa territorial orientada na direção Norte-Sul, afastada do Atlântico cerca de 30 km, com aproximadamente 30 km de largura e 130 km de comprimento, limitada a Norte na zona de Condeixa e a Sul junto a Alenquer. Também esta zona se localiza em depósitos de calcários Jurássicos predominantemente cálcicos.

As amostras dos sete fileres recuperados de granito foram recolhidas em centrais de produção de misturas betuminosas e provêm da utilização de agregados produzidos em pedreiras de variadas localizações. Quatro deles são provenientes do distrito do Porto, um do distrito de Bragança, outro do distrito de Viseu e um outro do distrito de Évora.

O filer recuperado de riólito provém de Ourique no distrito de Beja.

Os três fileres artificiais, cal hidratada, cal hidráulica e cimento Portland têm origem respetivamente nos distritos de Santarém, Leiria e Setúbal. A cal hidratada utilizada, produzida pela Lusical, é do tipo CL 90 S, de acordo com a norma europeia EN 459-1 (CEN, 2015) e a norma americana ASTM C1097-13 (2013), ou seja, do tipo I se tomarmos como referência a norma americana AASHTO M303-06 (2006). A cal hidráulica utilizada no estudo é do tipo HL5, de acordo com a EN 459-1 (2015), produzida pela Secil Martingança em Maceira e o cimento Portland é do tipo II 32,5N, segundo a EN 197-1 (CEN, 2011), fabricado pela Secil em Outão.

Para a maior parte dos fileres recuperados foram ainda recolhidas amostras do agregado fino que deu origem ao filer recuperado. Estas amostras, referenciadas por AFRG para os agregados graníticos e AFRC no caso dos agregados calcários, foram igualmente recolhidas na central de produção de misturas betuminosas. O objetivo desta amostragem foi o de permitir a realização de alguns ensaios, para avaliar o efeito da passagem do agregado no queimador da central de produção de misturas betuminosas. Não foi possível, no entanto, obter amostras dos agregados AFRG6 e AFRC3, ou seja, dos agregados que deram origem aos fileres FRG6 e FRC3.

Em termos de material pétreo procedeu-se ainda à recolha de amostras de bolcos de rocha, recolhidas em algumas pedreiras que produzem os agregados utilizados no estudo. Foram amostrados elementos de rocha das pedreiras que produzem os agregados AFRG1, AFRG3, AFRG5, AFRC1, AFRC5, AFRC6. As amostras recolhidas foram referenciadas por RAFRG1, RAFRG3, RAFRG5, RAFRC1, RAFRC5 e RAFRC6.

Antes da preparação das amostras para a execução dos ensaios foi realizada uma análise macroscópica aos fileres e respectivos agregados, que permitiu desde logo registar, através das propriedades sensoriais, que dois dos fileres recuperados de granito, FRG2 e FRG4 apresentavam elevado estado de contaminação, eventualmente por combustível das respetivas centrais de produção de misturas betuminosas.

Estes fileres apresentam elevada repelência à água, não permitindo, quando molhados, formar uma pasta. As partículas formam grupos de aglomerados nos quais a água tem muita dificuldade em penetrar, evidenciando a existência de uma gordura proveniente dos combustíveis utilizados na central.

Estes fileres foram caracterizados, mas foram rejeitados quando se tornou necessário selecionar algumas das amostras, para a realização de ensaios em mástiques betuminosos e em misturas betuminosas.

6.1.2. Granulometria

6.1.2.1. Por peneiração

Neste estudo foram realizadas, a todos os fileres, análises granulométricas por peneiração a jato de ar, segundo a norma EN 933-10 (CEN, 2009). Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.1.

Tabela 6.1 Resultados das análises granulométricas dos fileres por peneiração a jato de ar

Filer	P 2,0 mm	P 0,125 mm	P 0,063 mm	Filer	P 2,0 mm	P 0,125 mm	P 0,063 mm
FRG1	100	83	60	FRC1	100	86	67
FRG2	100	98	93	FRC2	100	85	72
FRG3	100	86	58	FRC3	100	86	68
FRG4	100	78	56	FRC4	100	90	74
FRG5	100	85	67	FRC5	100	59	43
FRG6	100	94	81	FRC6	100	87	74
FRG7	100	82	64	FC1	100	97	78
FRR	100	83	60	FC2	100	100	90
Chda	100	100	99	FC3	100	98	79
Chca	100	95	80	FC4	100	92	72
Cem	100	99	95	FC5	100	54	43

Px Percentagem de material passado acumulado no peneiro de abertura x milímetros

Os resultados obtidos permitem estabelecer alguns comentários:

- os fileres recuperados possuem granulometrias muito distintas, apresentando valores limite no que diz respeito ao material passado no peneiro 0,063 mm entre 43 e 93 %, respetivamente para os fileres FRC5 e FRG2;
- dos 14 fileres recuperados ensaiados, 1 reólito, 6 calcários e 7 graníticos, apenas 3 fileres calcários e 3 fileres graníticos cumprem os requisitos granulométricos definidos na norma europeia EN 13043 (CEN, 2002). Todos os restantes fileres recuperados apresentam granulometria mais grosseira;
- quanto aos fileres comerciais, o filer de calcário FC5 apresenta granulometria muito grosseira, não cumprindo com os requisitos normativos;
- a cal hidráulica apresenta partículas de dimensão superior a 0,063 mm em percentagem muito superior aos outros dois fileres artificiais.

Foram ainda realizados, para alguns fileres, ensaios de análise granulométrica por peneiração manual, por via seca e por via húmida, utilizando como norma de referência a norma europeia EN 933 -1 (CEN, 2012). O objetivo da realização destes ensaios foi o de avaliar se os resultados obtidos por algum dos métodos, via seca ou via húmida, da peneiração manual, se assemelham aos resultados obtidos por jato de ar. Os resultados desta comparação são apresentados na tabela 6.2 e evidenciam que os resultados da análise granulométrica por peneiração húmida são equivalentes aos resultados obtidos por peneiração a jato de ar.

Tabela 6.2 Resultados das análises granulométricas dos fileres
por peneiração via seca, via húmida e jato de ar

Referência do Filer	Tipo de ensaio realizado								
	Peneiração via seca			Peneiração via húmida			Peneiração jato de ar		
	P 2,0 mm	P 0,125 mm	P 0,063 mm	P 2,0 mm	P 0,125 mm	P 0,063 mm	P 2,0 mm	P 0,125 mm	P 0,063 mm
FRG1	100	84	66	100	84	68	100	83	69
FRG2	100	98	86	100	98	91	100	98	93
FRC1	100	85	63	100	86	66	100	86	67
FC1	100	96	70	100	96	76	100	97	78
FC2	100	100	72	100	100	89	100	100	90
FC3	100	98	73	100	98	77	100	98	79

Px Percentagem de material passado acumulado no peneiro de abertura x milímetros

6.1.2.2. Difração laser

Como já referido no capítulo 3, a determinação da granulometria através da separação da amostra por peneiros não é adequada para conhecer a granulometria dos fileres, pois apenas caracteriza uma pequena fração granulométrica do material.

Assim, para todos os fileres estudados, foram realizados ensaios de granulometria por difração laser, segundo a norma ISO 13320 (2009), iniciando-se o estudo pela realização de ensaios prévios, para avaliar qual o método e condições mais adequadas. O ensaio de difração laser realizado por via húmida, com utilização de água, sem agente dispersante e com ultrassons, parece ser o mais adequado, devendo no entanto ser executado sempre um estudo prévio, no sentido de selecionar o fluido, o tipo de dispersante e o tempo e energia de agitação para dispersão das partículas.

Este foi o método utilizado na generalidade das amostras. No entanto, devido à forte atividade dos fileres artificiais em água, optou-se por utilizar, para estes fileres, o método por via seca. Antes da realização dos ensaios as amostras foram preparadas, procedendo-se à desagregação de eventuais grumos existentes, secagem em estufa e eliminação, por peneiração, das partículas de diâmetro superior a 0,125 mm.

Os resultados obtidos nos ensaios de difração laser são apresentados na tabela 6.3 e nas figuras 6.1 a 6.5.

Tabela 6.3 Resultados dos ensaios de difração laser da fração 0/0,125 mm dos fileres

Filer	Diâmetro das partículas (μm)							
	1	10	20	40	60	80	100	125
FRG1	4	28	42	61	76	86	94	100
FRG2	2	19	36	61	77	87	94	100
FRG3	1	15	26	45	62	76	87	100
FRG4	3	22	37	59	74	87	97	100
FRG5	1	15	27	48	66	79	88	100
FRG6	2	20	37	62	77	87	96	100
FRG7	2	17	28	48	62	74	84	100
FRR	5	35	45	60	73	84	94	100
FRC1	6	33	44	62	74	84	93	100
FRC2	7	47	59	75	86	93	99	100
FRC3	9	49	60	75	85	93	100	100
FRC4	10	46	58	73	84	92	98	100
FRC5	10	52	61	74	84	92	98	100
FRC6	3	23	38	57	70	79	87	100
FC1	9	53	59	71	81	90	98	100
FC2	11	58	65	78	91	96	100	100
FC3	9	49	55	68	81	90	98	100
FC4	11	57	64	76	85	94	100	100
FC5	11	58	66	75	83	91	95	100
Chda	16	72	81	91	96	98	100	100
Chca	8	44	57	73	82	89	100	100
Cem	8	45	61	81	91	95	100	100

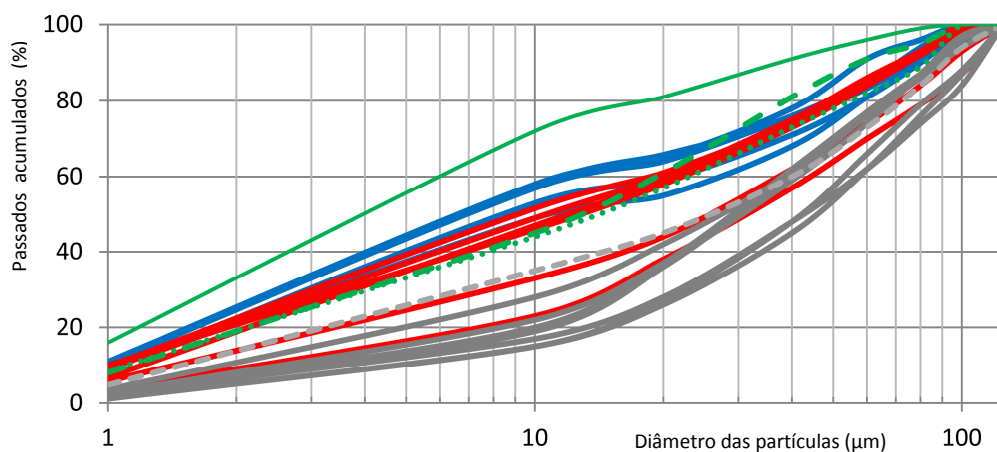


Figura 6.1 Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres

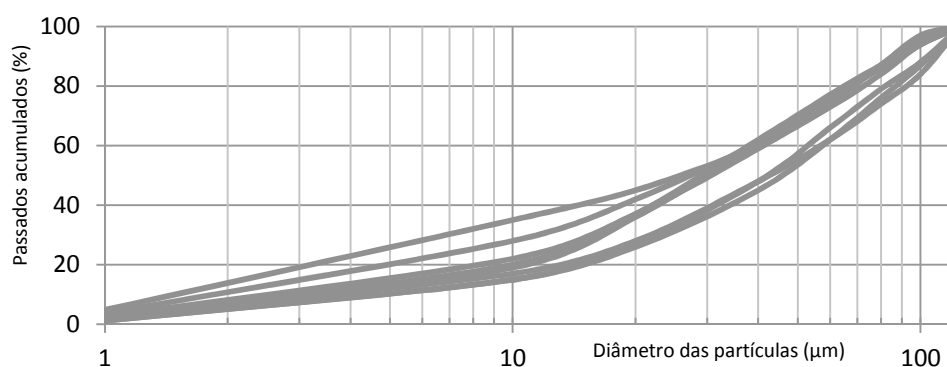


Figura 6.2 Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres FRG e FRR

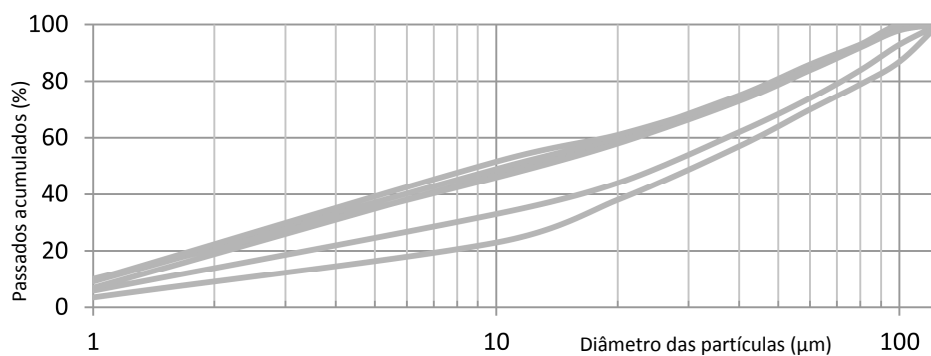


Figura 6.3 Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres FRC

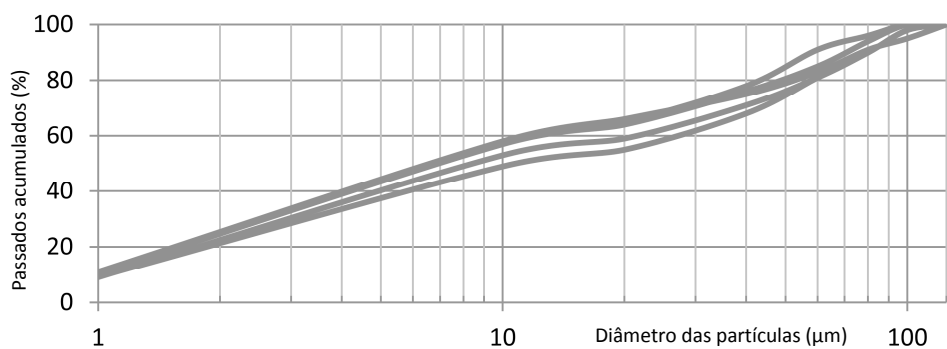


Figura 6.4 Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres FC

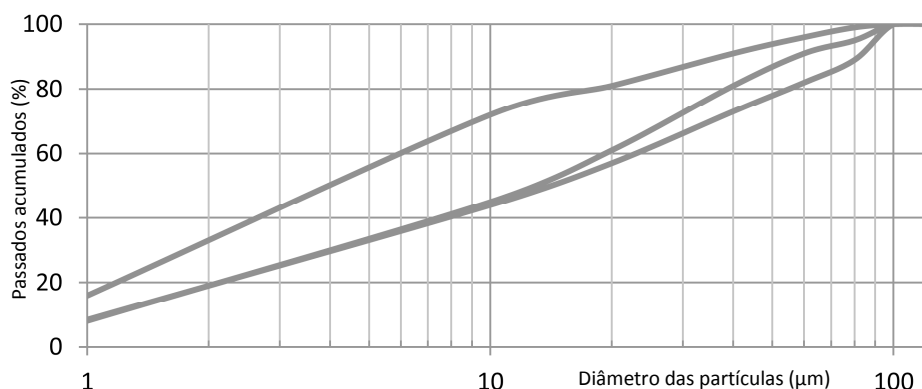


Figura 6.5 Curvas granulométricas da fração 0/0,125 mm dos fileres Chda, Chca e Cem

Analisando os resultados obtidos nos estudos granulométricos da fração 0/0,125 mm dos materiais ensaiados, é possível apresentar alguns comentários:

- todos os fileres apresentam uma distribuição granulométrica mais ou menos contínua, exceção feita aos fileres comerciais de calcário, que apresentam uma distribuição bimodal, com forte descontinuidade para valores do diâmetro das partículas entre 10 e 20 μm (figura 6.4);
- os fileres recuperados de granito são consideravelmente mais grosseiros que os restantes fileres, sendo que a generalidade destas amostras apresentam, aproximadamente, 20% de partículas de dimensões inferiores a 10 μm , enquanto que para os fileres recuperados de calcário, esta percentagem é na generalidade dos casos superior a 40%;
- os fileres de calcário apresentam granulometria mais fina que os fileres recuperados de calcário e apenas eles apresentam uma distribuição bimodal;
- o cimento e a cal hidráulica apresentam granulometrias muito semelhantes, sendo a cal hidratada o filer de granulometria mais fina.

Os programas para o tratamento dos resultados obtidos nos ensaios, que acompanham os equipamentos de difração laser, permitem obter uma série de parâmetros definidores da distribuição granulométrica das partículas (Mingard *et al.*, 2009):

- distribuição gráfica através da curva granulométrica e do histograma de distribuição (figura 6.6);
- D_x , diâmetro correspondente a x% de passados, (μm);
- médias móveis $D [4;3]$ (Diâmetro médio de Brouckere), e $D [3;2]$ (Diâmetro médio de Sauter), ambas em micrometros, sendo:

$$D [4; 3] = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^4}{\sum_{i=1}^n D_i^3} \quad [6.1]$$

$$D [3; 2] = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad [6.2]$$

Em que:

D - diâmetros das partículas existentes na amostra, (μm).

A média móvel $D [3;2]$, designada por “*Surface Moment Mean*” ou “*Sauter Mean Diameter*” representa, por analogia ao momento de inércia da mecânica, o centro de gravidade da distribuição, em termos de superfície específica das partículas (Merkus, 2009). Assim, numa distribuição volumétrica do tipo normal, o valor desta grandeza irá aparecer à esquerda do diâmetro médio, ou seja, para diâmetros inferiores ao diâmetro médio, pois que para um determinado volume de partículas, quanto menor o diâmetro, maior será a superfície específica dessas mesmas partículas (figura 6.7).

O parâmetro $D [4;3]$ “*Volume Moment Mean Diameter*” ou “*Brouckere Mean Diameter*” representa o centro de gravidade da distribuição em termos de volume, sendo pois mais adequado quando se pretende dar maior representatividade às partículas de maior diâmetro da amostra (Mingard *et al.*, 2009).

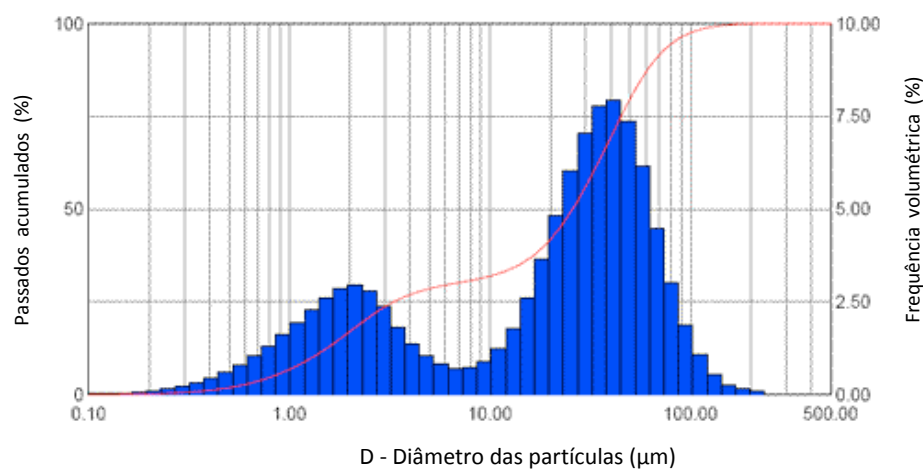


Figura 6.6 Exemplo de uma curva granulométrica de um filer (vermelho) e respetivo histograma de distribuição (azul)

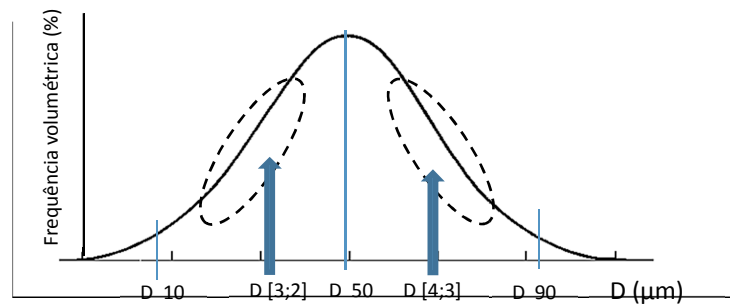


Figura 6.7 – Parâmetros $D [3;2]$ e $D [4;3]$ para uma distribuição granulométrica do tipo normal

Os resultados obtidos permitiram calcular os coeficientes de uniformidade Cu [6.3], os coeficientes de curvatura Cc [6.4] e os módulos de finura MF [6.5]. Estes coeficientes, usualmente considerados para atender à distribuição granulométrica dos materiais granulares, foram calculados rejeitando a fração do filer retida no peneiro 0,125 mm.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [6.3]$$

Em que:

Cu – Coeficiente de uniformidade (adimensional);

D_{60} – Diâmetro da partícula a que corresponde 60% de material passado (μm);

D_{10} – Diâmetro da partícula a que corresponde 10% de material passado (μm).

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad [6.4]$$

Em que:

Cc – Coeficiente de curvatura (adimensional);

D_{30} – Diâmetro da partícula a que corresponde 30% de material passado (μm);

$$MF = \frac{RA_{75} + RA_{50} + RA_{30} + RA_{20} + RA_{10} + RA_5 + RA_3 + RA_1}{100} \quad [6.5]$$

Em que:

MF – Módulo de finura (percentagem);

RA_i – Percentagem de material de dimensão superior a i micrómetros (%).

No entanto, o estudo demonstrou que os coeficientes de uniformidade Cu e de curvatura Cc não são adequados para caracterizar os materiais em estudo. Na realidade, apesar das distribuições granulométricas dos materiais estudados serem bem distintas umas das outras, observando-se, por exemplo, forte descontinuidade granulométrica para os fileres comerciais calcários, estas diferenças não se apresentam refletidas nos valores obtidos para estes parâmetros. Uma das razões deve-se ao facto de os dois parâmetros utilizarem a grandeza D_{10} , que para estes materiais correspondem a diâmetros de partículas muito pequenos, o que conduz a valores não muito exatos. Para muitos dos materiais estudados o valor de D_{10} corresponde a diâmetros de partículas da ordem de 1 μm , valores difíceis de caracterizar face à elevada amplitude dos diâmetros das partículas. Assim sendo, o valor de D_{10} apresenta, para estes casos, uma incerteza associada muito elevada, que se reflete nos valores de Cu e Cc , verificando-se, para estes parâmetros, valores que não traduzem com rigor a distribuição granulométrica dos materiais.

Assim, procurou-se realizar o estudo dos valores obtidos nos ensaios, com o objetivo de estabelecer um outro coeficiente, que melhor definisse as diferenças granulométricas observadas nestes materiais. Após várias formulações de ajuste entre os resultados obtidos experimentalmente e uma série alargada de possíveis parâmetros, sugere-se, para o caso dos fileres, a adoção de um novo parâmetro, dado pelo cociente entre a diferença entre o D_{75} e o D_{25} , e o D_{50} [6.6], que se designou por Cg , coeficiente granulométrico do filer. A aplicação deste parâmetro tem a vantagem de deslocar o estudo um pouco para a zona mais grossa do material, evitando assim as partículas de diâmetros muito pequenos, difíceis de quantificar com exatidão.

$$Cg = \frac{D_{75} - D_{25}}{D_{50}} \quad [6.6]$$

Em que:

Cg – Coeficiente granulométrico do filer (adimensional);

D_{75} – Diâmetro da partícula a que corresponde 75% de material passado (μm);

D_{50} – Diâmetro da partícula a que corresponde 50% de material passado (μm);

D_{25} – Diâmetro da partícula a que corresponde 25% de material passado (μm).

O parâmetro C_g não só permite obter informações quanto à extensão da granulometria do filer, como é sensível ao facto de o material apresentar descontinuidade granulométrica, aproximadamente na zona central da sua distribuição.

Na tabela 6.4 são apresentados os valores de C_u , C_c , MF e C_g obtidos para os fileres ensaiados.

Tabela 6.4 Valores de C_u , C_c , MF , C_g e D [3;2] da fração 0/0,125 mm dos fileres

Filer	C_u	C_c	MF	C_g	D [3,2]
FRG1	17,7	1,7	4,9	1,5	6,9
FRG2	8,1	1,4	5,2	1,4	9,2
FRG3	7,3	1,2	5,8	1,4	20,0
FRG4	8,2	1,1	5,2	1,5	16,2
FRG5	8,7	1,6	5,7	1,3	13,2
FRG6	7,9	1,8	5,2	1,4	---
FRG7	12,9	1,8	5,7	1,5	---
FRR	20,0	1,0	4,7	2,4	6,4
FRC1	23,8	1,3	4,8	1,7	5,0
FRC2	13,1	0,5	3,9	3,3	3,2
FRC3	13,3	0,5	3,8	3,4	3,6
FRC4	23,0	1,6	3,9	2,9	3,3
FRC5	19,0	0,8	3,6	4,5	6,1
FRC6	11,0	1,3	5,3	1,7	7,7
FC1	21,0	0,3	3,8	5,9	2,7
FC2	13,3	0,5	3,3	6,1	2,4
FC3	24,5	0,3	3,9	4,1	3,0
FC4	15,0	0,5	3,5	6,0	2,6
FC5	11,8	0,4	3,4	7,0	4,6
Chda	18,0	2,0	2,6	1,9	1,8
Chca	15,3	1,0	4,1	2,9	3,0
Cem	10,5	1,2	3,9	1,9	2,8

A análise dos valores permite concluir que os fatores mais diferenciadores dos materiais são os coeficientes C_g e $D [3;2]$, observando-se:

- valores de C_g muito superiores para os fileres calcários, valores intermédios para os fileres recuperados de calcário e valores mais baixos para os fileres recuperados de granito;
- valores de $D [3;2]$ baixos para os fileres calcários, intermédios para os fileres recuperados de calcário e mais elevados para a generalidade dos fileres recuperados de granito.

6.1.3. Forma e angulosidade das partículas e textura da superfície das partículas

A avaliação das características de forma e angulosidade das partículas e da textura da superfície não se encontra prevista na norma europeia EN 13043 (CEN, 2002). Porém, são características que, segundo vários investigadores influenciam, não só o arranjo entre partículas, fazendo variar pois os vazios entre as partículas do filer, mas também a rigidez do mástique betuminoso (NCHR, 2010). No entanto, não é fácil a avaliação de cada uma destas características de forma isolada, e, muito menos, avaliar de que forma cada uma delas, interfere no desempenho da mistura betuminosa.

Como já referido no capítulo 3 a forma das partículas é, em parte, responsável pelo valor dos vazios do filer compactado, sendo pois uma característica que influencia o efeito rigidificante do filer no mástique betuminoso, afetando, assim, não só o seu comportamento reológico, mas também a adesão do mástique ao agregado.

A forma das partículas dos fileres pode ser avaliada por processos óticos, tais como descritos no capítulo 3, ou acoplando sistemas óticos aos equipamentos de difração laser. As imagens obtidas são registadas e analisadas, permitindo obter coeficientes de forma adequados ao tamanho das partículas.

Neste trabalho foram observadas as frações 0/0,125 mm das seguintes amostras:

- fileres recuperados de granito: FRG1, FRG2, FRG5 e FRG7;
- agregados que deram origem a estes fileres, respetivamente AFRG1, AFRG2, AFRG5 e AFRG7;
- fileres recuperados calcários: FRC1, FRC5 e FRC6;
- agregados que deram origem a estes fileres, respetivamente: ARC1, AFRC5 e AFRC6;

- filer comercial de calcário FC1;
- cal hidráulica Chca;
- cimento Cem;
- cal hidratada Chda.

Os ensaios foram realizados por microscopia ótica, por método de observação de imagens com as partículas em modo estático, segundo a metodologia descrita no capítulo 3 deste trabalho, com a utilização de uma lupa da marca Leica modelo M205 C (figura 6.8). Este equipamento possui elevada ampliação, obtendo-se imagens tridimensionais de elevada resolução, permitindo a observação de detalhes na dimensão dos 500 nm de elevada pormenorização, devido à grande profundidade de campo das suas lentes. É possível ainda o registo fotográfico das imagens. No entanto, este registo não permite obter o que na realidade é observado, pois a imagem perde o efeito estereoscópico/tridimensional com o qual é permitido obter uma visão das partículas, capaz de entender melhor todos os aspetos relacionados com a forma, e principalmente com as características da superfície das partículas.



Figura 6.8 Lupa existente na FCUP e utilizada na observação dos fileres

Nas figuras 6.9 a 6.12 são apresentadas imagens obtidas para as frações 0/0,125 mm dos fileres recuperados de granito e dos agregados que lhes deram origem.

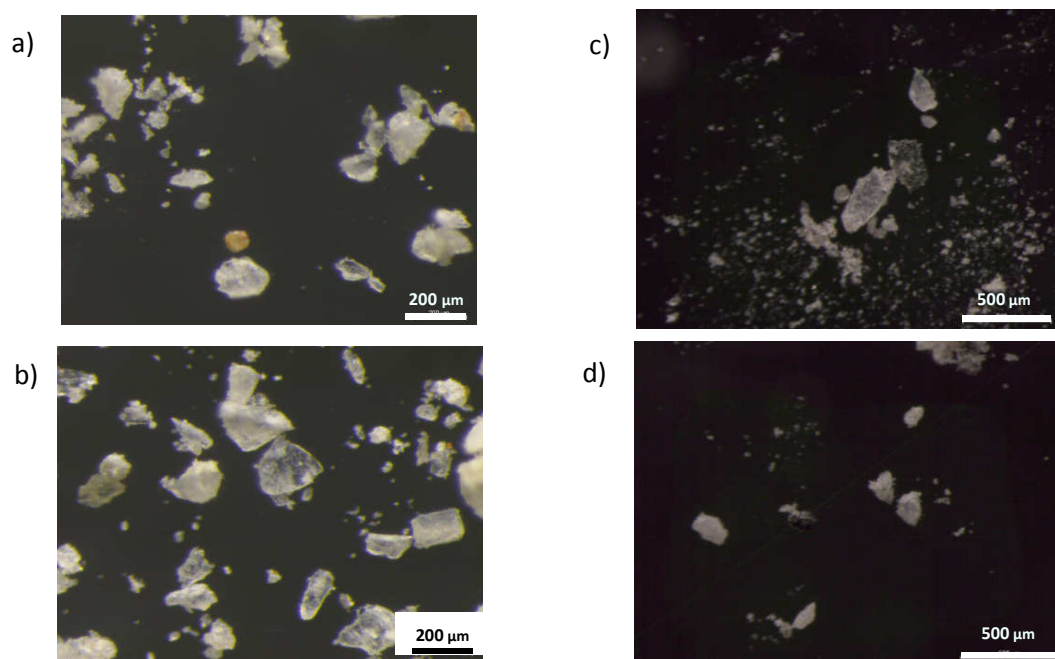


Figura 6.9 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG1 a) e b) e do filer FRG1 c) e d)

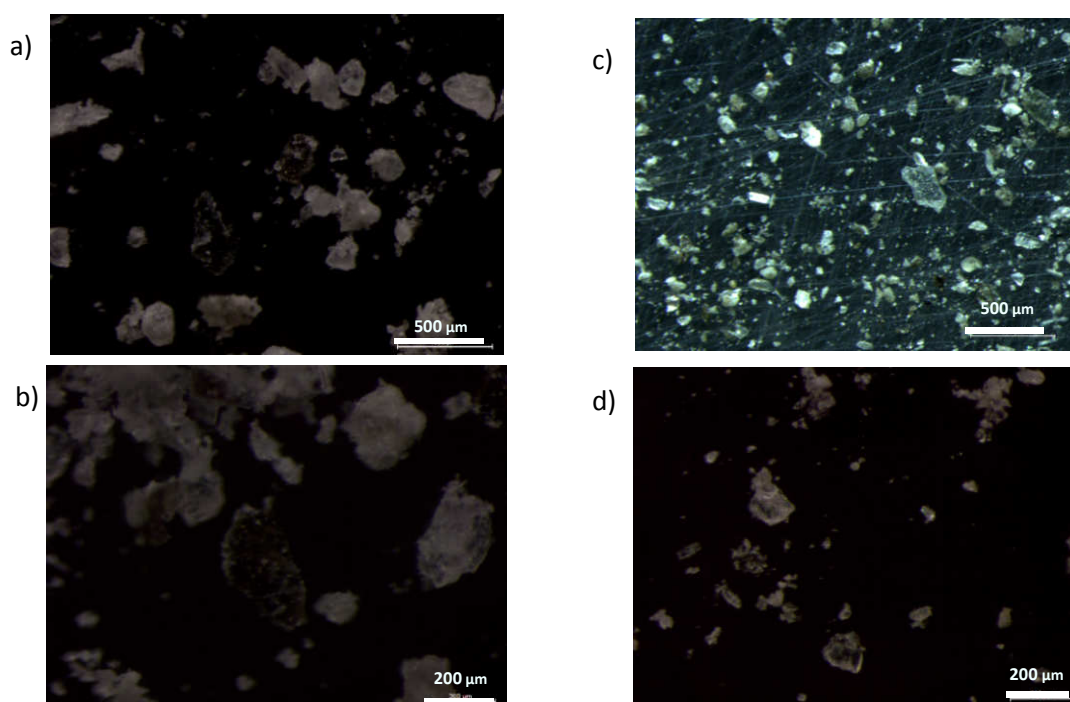


Figura 6.10 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG2 a) e b) e do filer FRG2 c) e d)

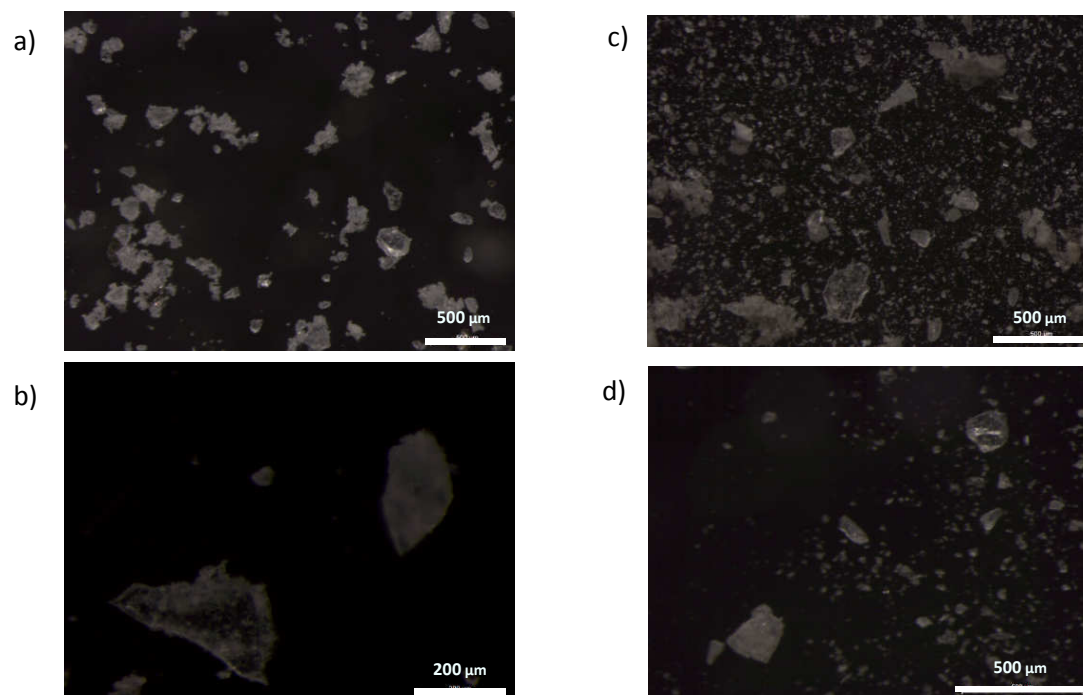


Figura 6.11 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG5 a) e b) e do filer FRG5 c) e d)

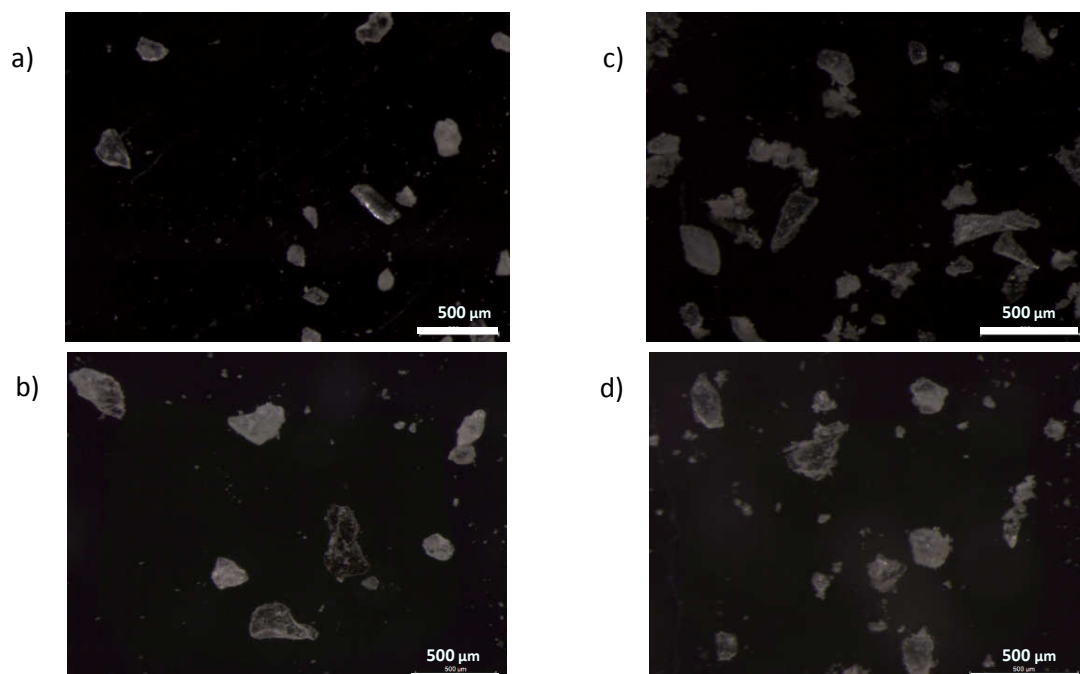


Figura 6.12 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRG7 a) e b) e do filer FRG7 c) e d)

Os fileres recuperados de granito e os agregados que lhes deram origem são constituídos por partículas cristalinas, angulosas, algumas com formas muito lamelares, com superfícies muito planas de forte clivagem. As partículas são translúcidas, correspondentes aos minerais de quartzo e de feldspato, mas em todas as amostras é possível observar partículas de cor escura e forma achatada correspondentes às micas. As partículas de maior diâmetro apresentam-se geralmente com as superfícies sem partículas aderentes, e os aglomerados de partículas são facilmente anulados, sendo pois fácil a individualização das partículas.

Não foi possível observar diferenças significativas entre os vários fileres recuperados de granito, nem entre os fileres e os agregados que lhes deram origem.

Apenas para o filer recuperado FRG2 se observou alguma dificuldade em desaglomerar as partículas no sentido de as individualizar. O facto de esta característica se observar apenas para este filer recuperado granítico, deve estar associado à contaminação observada neste filer, já referida na introdução deste capítulo.

Nas figuras 6.13 a 6.15 são apresentadas imagens obtidas para as frações 0/0,125 mm dos fileres recuperados de origem calcária e respectivos agregados.

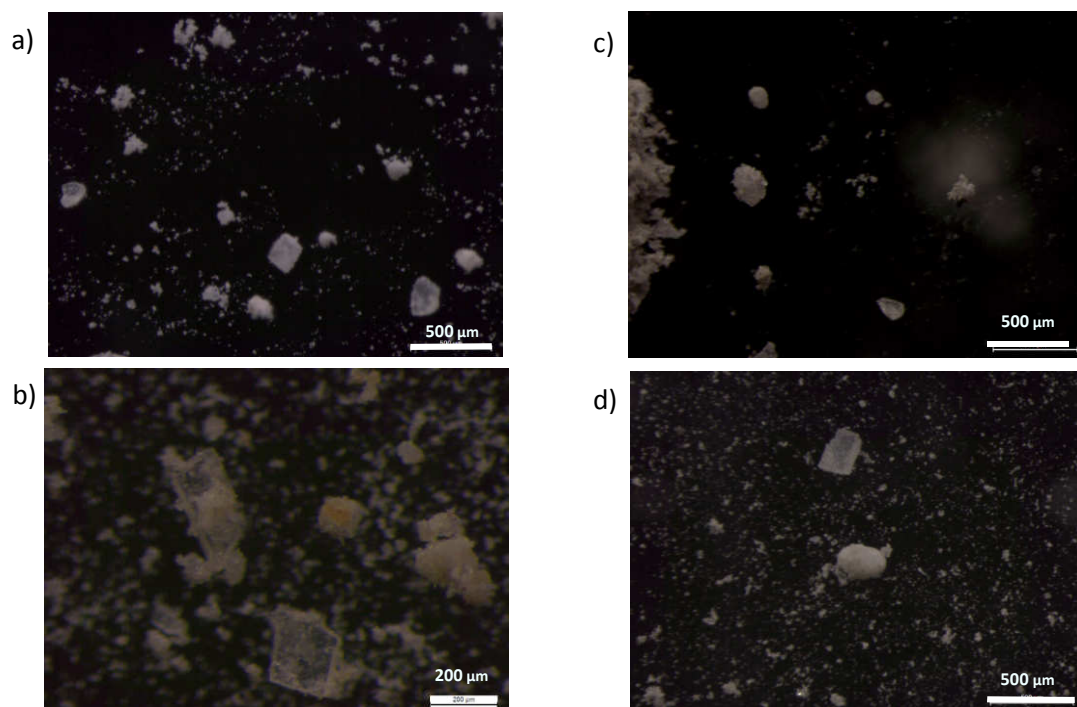


Figura 6.13 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRC1 a) e b) e do filer FRC1 c) e d)

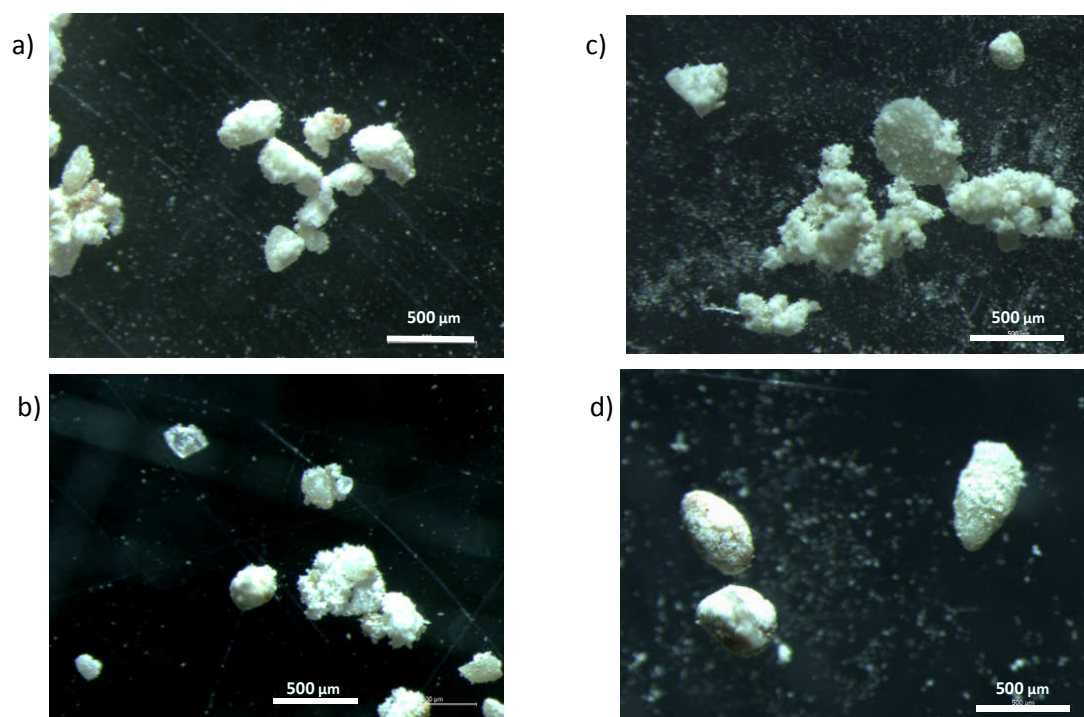


Figura 6.14 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRC5 a) e b) e do filer FRC5 c) e d)

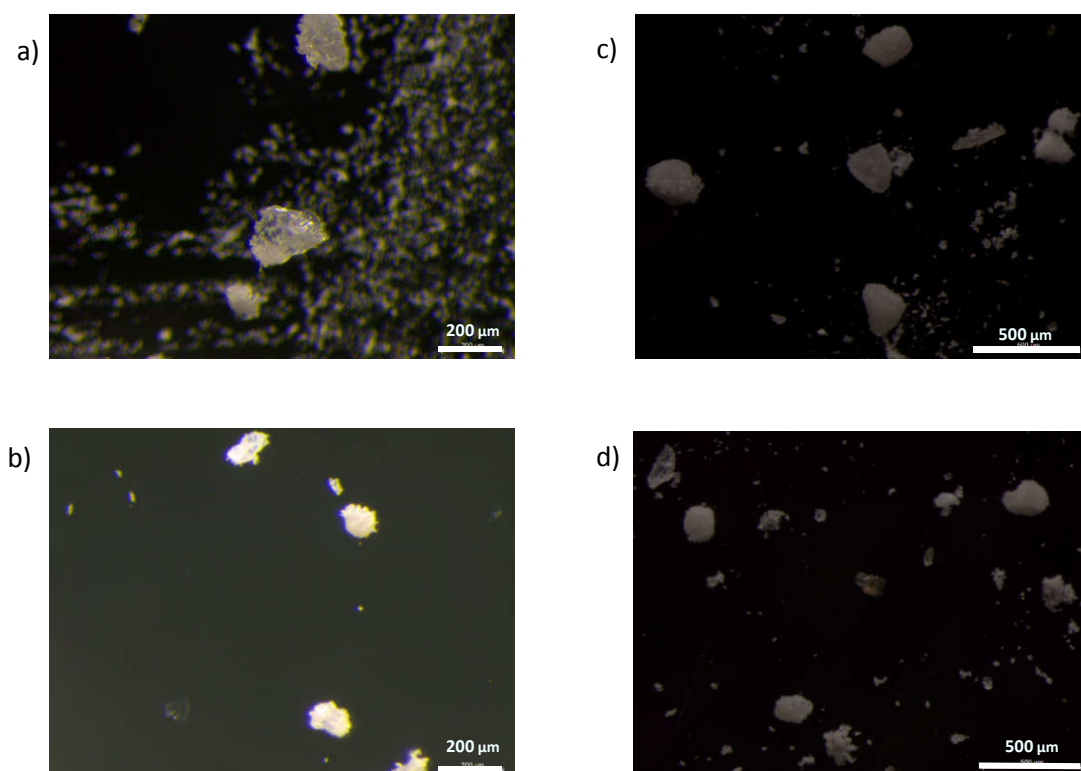


Figura 6.15 Imagens das frações 0/0,125 mm do agregado AFRC6 a) e b) e do filer FRC6 c) e d)

Os fileres recuperados de calcário e os agregados que lhe deram origem apresentam, à exceção do FRC6, as partículas de maiores dimensões revestidas quase na totalidade por partículas de menores dimensões aderidas, ocultando, desta forma, as superfícies das maiores partículas. Formam aglomerados difíceis de desagregar, sendo difícil encontrar na amostra partículas individualizadas. Apesar de difíceis de observar, foi possível distinguir formas regulares, cúbicas, cristalinas, de superfícies cristalinas e arestas polidas.

O filer FRC6 e o agregado que lhe deu origem apresentam comportamento bem distinto, com partículas individualizadas, com poucos aglomerados, sendo que e as partículas de maiores dimensões não se apresentam revestidas por outras partículas. Na realidade, este filer apresenta granulometria muito mais grosseira que os restantes, conforme já concluído com os resultados obtidos nos ensaios de análise granulométrica da amostra.

De entre as seis amostras de fileres comerciais calcários foi selecionado para observação o FC1, cujas imagens são apresentadas na figura 6.16.

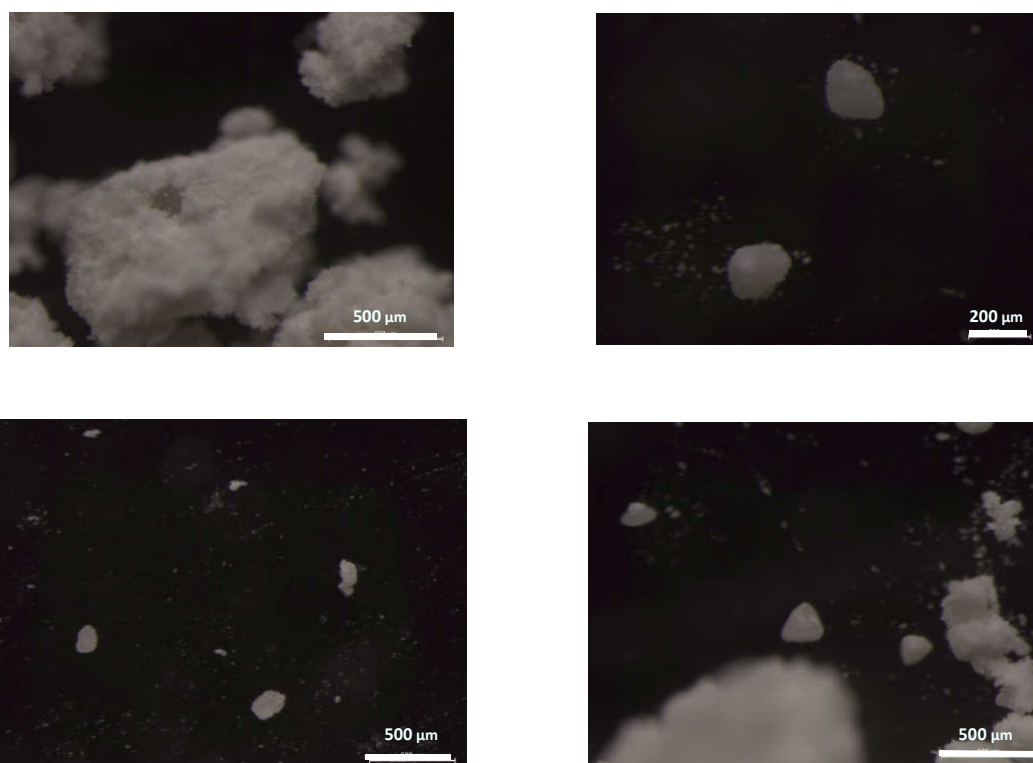


Figura 6.16 Imagens da fração 0/0,125 mm do filer comercial FC1

As partículas do filer comercial de calcário FC1 apresentam forma idêntica aos fileres recuperados de calcário. As partículas de maiores dimensões encontram-se revestidas

por partículas de menores dimensões, aderidas às superfícies e formam aglomerados difíceis de desagregar. Apresentam formas regulares, cúbicas, angulosas de superfícies cristalinas e arestas polidas.

Em algumas das figuras apresentadas é possível observar partículas individualizadas, mas, no entanto, tratam-se de imagens selecionadas, obtidas de zonas muito restritas da amostra, pois, na realidade, a generalidade da amostra apresenta grupos de grandes aglomerados de partículas.

Este mesmo aspeto aplica-se às figuras 6.17 a 6.19, que dizem respeito a imagens captadas durante a observação dos fileres artificiais.

No caso dos fileres artificiais também se verifica a existência de partículas de maiores dimensões, revestidas por outras partículas aglomeradas, difíceis de individualizar, com formas regulares e cristalinas. Este comportamento é mais evidente no caso da cal hidratada, em que se observam enormes grumos de partículas formando cadeias que se assemelham a filamentos.

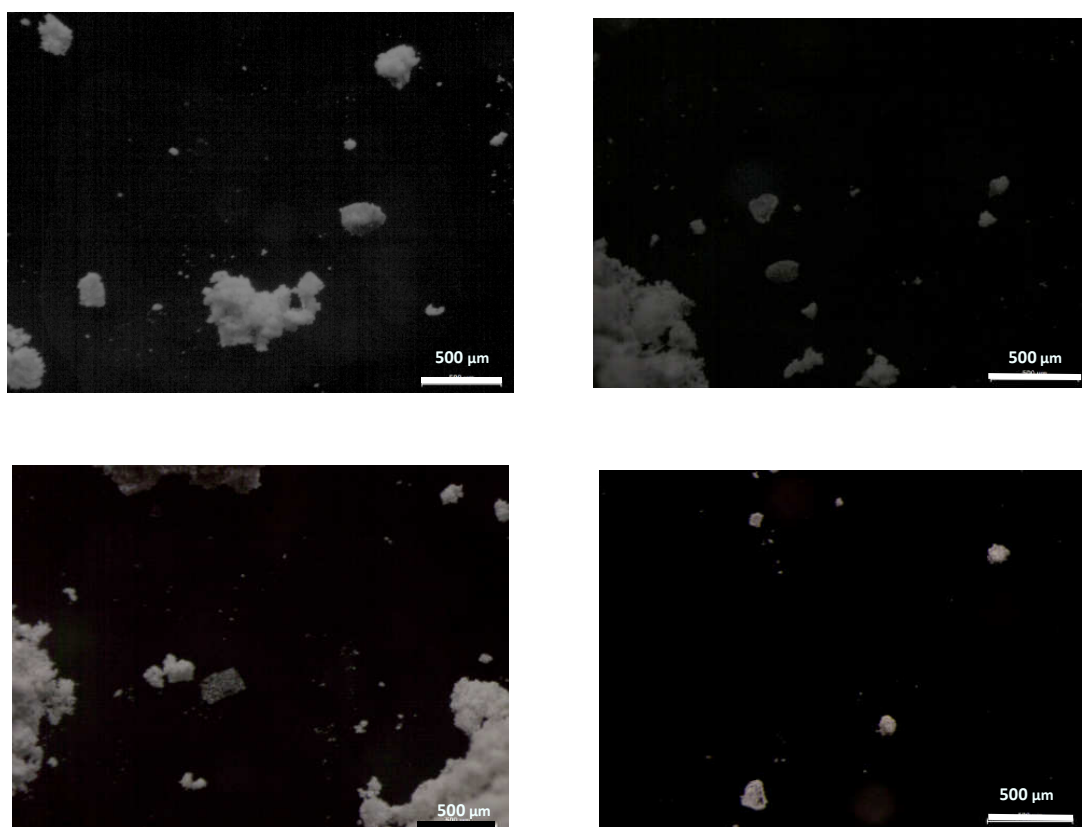


Figura 6.17 Imagens da fração 0/0,125 mm do filer Chca

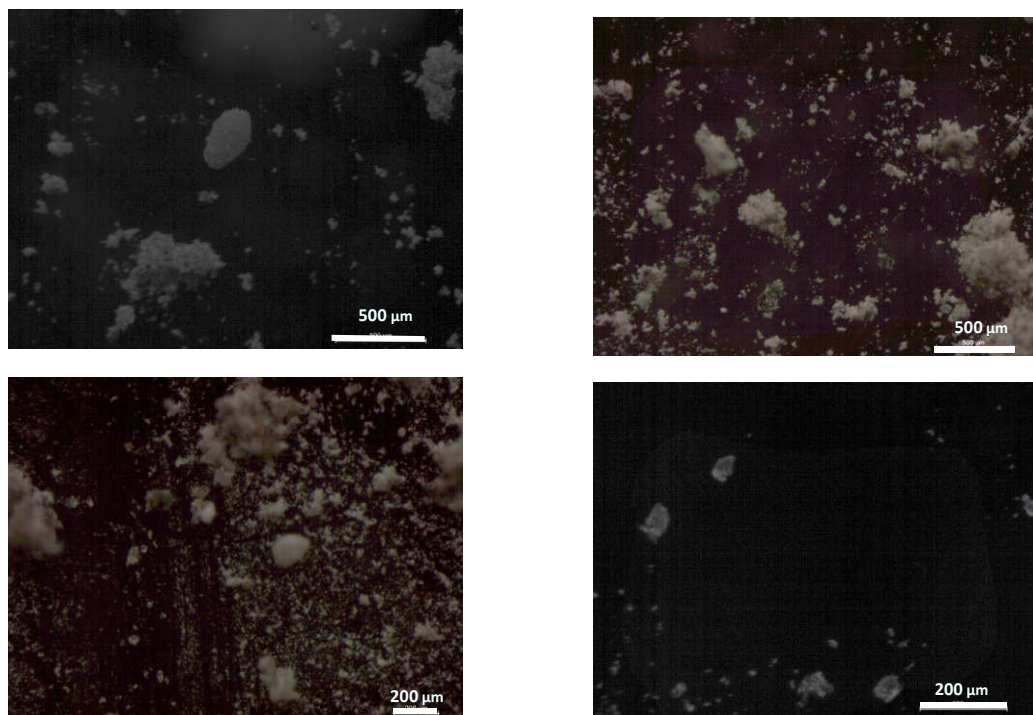


Figura 6.18 Imagens da fração 0/0,125 mm do filer Cem

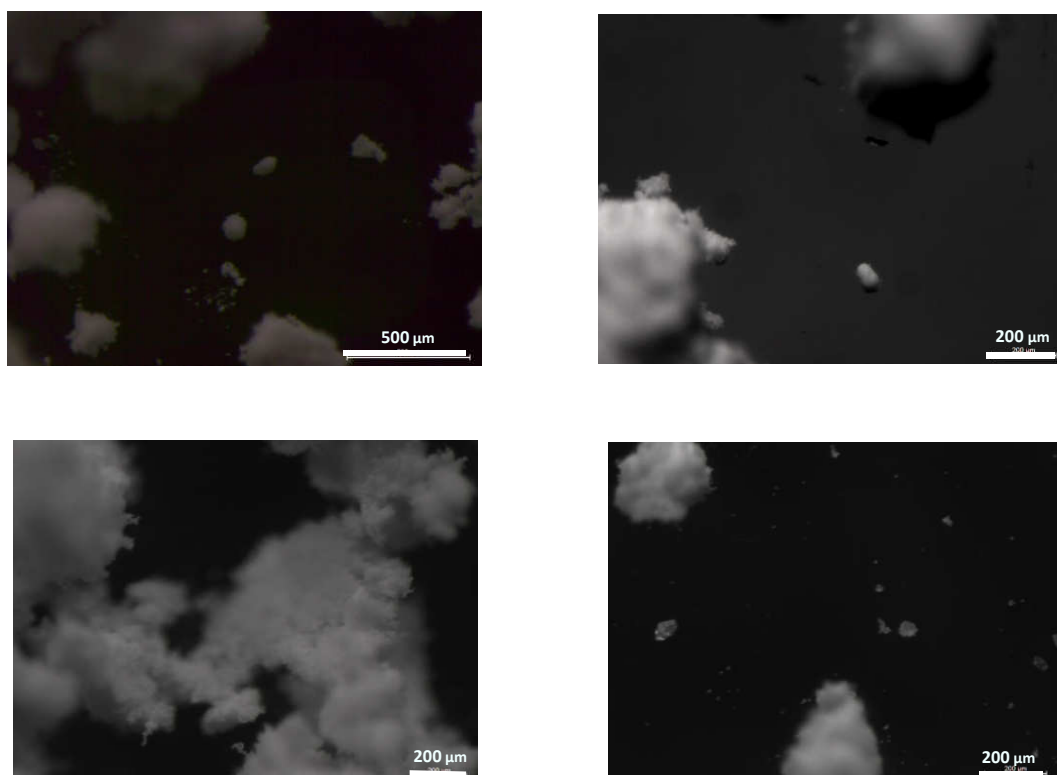


Figura 6.19 Imagens do filer Chda

6.1.4. Massa volúmica do filer

A massa volúmica do filer deve ser entendida como a massa das partículas do filer por unidade do volume real das partículas, e deve ser quantificada segundo o descrito na norma de ensaio europeia EN 1097-7 (CEN, 2008).

Como já referido no capítulo 3, uma abordagem prévia ao método de ensaio, previsto na norma europeia, permitiu concluir da inadequabilidade do método para algumas das amostras ensaiadas. Esta dificuldade foi também observada por Antunes em 2013. Assim, o método de ensaio utilizado neste estudo, foi o previsto na norma EN 196-6 (CEN, 2010), no qual a quantificação do volume das partículas do filer é realizada, através do volume de querosene deslocado no interior de um voluminímetro designado por Chatelier (figura 6.20).

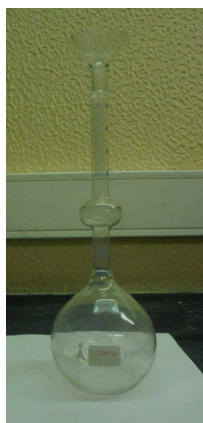


Figura 6.20 - Voluminímetro Chatelier

A maior quantidade do provete, um voluminímetro mais adequado e uma técnica mais repetível, aconselham a utilização desta metodologia na avaliação da massa volúmica dos fileres.

Também a metodologia americana recomenda, para os fileres, a adoção do procedimento definido na norma AASHTO T133-11 (2011) que especifica a utilização do voluminímetro Chatelier e um procedimento em tudo análogo ao método definido na norma europeia EN 196-6 (CEN, 2010).

De referir ainda que a norma AASHTO T133-11 (2011) apresenta valores de repetibilidade e reprodutibilidade, respetivamente de 0,012 e 0,037 Mg/m³, enquanto que os valores dos mesmos parâmetros apresentados na norma europeia EN 1097-7 (CEN, 2008) são de 0,06 e 0,07 Mg/m³, valores estes muito superiores aos observados para o método do voluminímetro Chatelier.

A norma europeia EN 13043 (CEN, 2002) determina que a massa volúmica seja quantificada e o seu valor declarado. Nas tabelas 6.5 e 6.6 e na figura 6.21 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados para as frações 0/0,125 mm dos fileres e dos agregados finos que lhes deram origem.

As massas dos provetes utilizadas nos ensaios foram ajustadas, atendendo à densidade das partículas constituintes de cada filer. Para a generalidade dos fileres a massa do provete variou entre 57,5 e 64,5 g, exceção observada na cal hidratada em que, devido à sua baixa densidade, foi utilizada uma massa próxima de 39,5 g.

Tabela 6.5 Valores da massa volúmica da fração 0/0,125 mm dos fileres

Filer	ρf (Mg/m3)	Filer	ρf (Mg/m3)	Filer	ρf (Mg/m3)	Filer	ρf (Mg/m3)				
FRG1	2,64	FRC1	2,71	FC1	2,74	Chda	2,24				
FRG2	2,62	FRC2	2,69	FC2	2,74	Chca	2,70				
FRG3	2,68	FRC3	2,71	FC3	2,73	Cem	3,06				
FRG4	2,64	FRC4	2,70	FC4	2,72						
FRG5	2,60	FRC5	2,71	FC5	2,73						
FRG6	2,68	FRC6	2,69								
FRG7	2,62										
FRR	2,66										

Tabela 6.6 Valores da massa volúmica da fração 0/0,125 mm dos agregados

Agregado (0/0,125 mm)	ρ_f (Mg/m ³)	Agregado (0/0,125 mm)	ρ_f (Mg/m ³)
AFRG1	2,73	AFRC1	2,73
AFRG2	2,73	AFRC2	2,72
AFRG3	2,70	AFRC4	2,73
AFRG4	2,72	AFRC5	2,75
AFRG5	2,71	AFRC6	2,74
AFRG7	2,70		
AFRR	2,71		

- no caso dos fileres artificiais, a cal hidráulica (Chca) apresenta um valor da massa volúmica de $2,70 \text{ Mg/m}^3$, ou seja, da ordem de grandeza dos valores verificados nos fileres recuperados de calcário. O cimento Portland (Cem) é o filer que apresenta maior valor da massa volúmica, $3,06 \text{ Mg/m}^3$, e a cal hidratada (Chda) o que apresenta menor valor, $2,24 \text{ Mg/m}^3$;
- o valor da massa volúmica dos fileres recuperados é sempre inferior ao valor da massa volúmica dos respetivos agregados, sendo que a diferença entre os valores é mais significativa para o agregado granítico do que para o agregado calcário. Estes dois aspetos podem ser explicados:
 - ✓ a aspiração na central de misturas betuminosas é mais eficaz para as partículas de menor densidade, resultando assim um produto de menor massa volúmica;
 - ✓ a presença de micas nos fileres recuperados de granito, consideravelmente menos densas do que os restantes minerais significativos, quartzo e feldspato, conduz à existência de uma maior percentagem de micas no filer recuperado do que na fração $0,125 \text{ mm}$ do agregado. Já os calcários apresentam quase exclusivamente um mineral, a calcite, pelo que a redução no valor da massa volúmica não é tão significativa como no caso dos materiais de granito.

Não foram realizados ensaios de determinação da massa volúmica para misturas de fileres, uma vez que o conceito de massa volúmica permite concluir, que a mistura de fileres tem um valor da massa volúmica igual ao valor calculado através da média de cada um dos fileres que compõem a mistura, média essa ponderada pela percentagem em que cada um deles entra na mistura.

Por fim, refira-se a necessidade de adequar a metodologia prevista na norma europeia de ensaio, alterando, nomeadamente, o tipo de picnómetro e a quantidade do provete a ensaiar, adaptando esta em função da densidade do material em análise, não considerando um valor fixo para a massa, qualquer que seja a natureza do filer.

6.1.5. Massa volúmica aparente do filer em querosene

O valor da massa volúmica aparente do filer em querosene representa a massa por unidade de volume do filer, não compactado, quando colocado em suspensão em querosene, devendo ser quantificado através do procedimento descrito no anexo A da

norma europeia EN 1097-3 (CEN, 1998). A norma europeia EN 13043 (CEN, 2002) determina que o valor desta propriedade deve ser quantificado e o seu valor declarado.

O ensaio consiste em avaliar o volume ocupado pelo filer dentro de uma proveta graduada, mantido em suspensão em querosene. Os valores obtidos nos ensaios de massa volúmica aparente para os diferentes fileres ensaiados, bem como os valores da concentração crítica calculados de acordo com a expressão 4.15, encontram-se descritos na tabela 6.7. Na tabela 6.8 são apresentados os valores da massa volúmica aparente dos agregados que deram origem aos fileres recuperados. Na figura 6.22 são apresentados, em gráfico, os valores da massa volúmica aparente de todos os materiais ensaiados. Dado o baixo valor da massa volúmica aparente da cal hidratada, a massa do provete utilizada no ensaio foi reduzida de 10 g, para aproximadamente 6 g.

Tabela 6.7 Valores da massa volúmica aparente e Cc da fração 0/0,125 mm dos fileres

Filer	B (Mg/m3)	Cc	Filer	B (Mg/m3)	Cc	Filer	B (Mg/m3)	Cc	Filer	B (Mg/m3)	Cc			
FRG1	0,67	0,25	FRC1	0,76	0,28	FC1	0,49	0,18	Chda	0,15	0,07			
FRG2	0,67	0,26	FRC2	0,53	0,20	FC2	0,45	0,16	Chca	0,51	0,19			
FRG3	0,84	0,31	FRC3	0,59	0,22	FC3	0,50	0,18	Cem	0,56	0,18			
FRG4	0,84	0,32	FRC4	0,63	0,23	FC4	0,48	0,18						
FRG5	0,73	0,28	FRC5	0,63	0,23	FC5	0,48	0,18						
FRG6	0,72	0,27	FRC6	0,77	0,29									
FRG7	0,72	0,27												
FRR	0,72	0,27												

Tabela 6.8 Valores da massa volúmica aparente da fração 0/0,125 mm dos agregados

Agregado (0/0,125)	B (Mg/m ³)	Agregado (0/0,125)	B (Mg/m ³)
AFRG1	0,78	AFRC1	0,87
AFRG2	0,84	AFRC2	0,69
AFRG3	0,77	AFRC4	0,63
AFRG4	0,87	AFRC5	0,77
AFRG5	0,80	AFRC6	0,56
AFRG7	0,84		
AFRR	0,74		

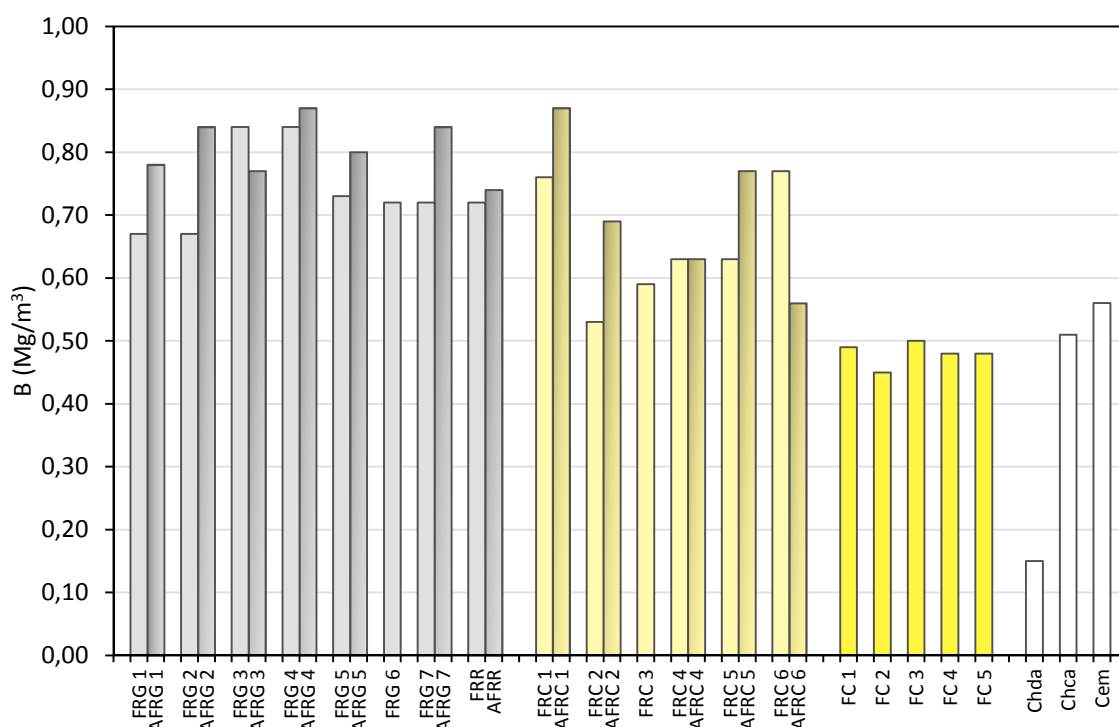


Figura 6.22 Valores da massa volúmica aparente dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

A análise dos valores obtidos, para a massa volúmica aparente dos fileres, permite observar o seguinte:

- os resultados obtidos, para os fileres recuperados de granito e de riólito, apresentam valores entre 0,67 e 0,84 Mg/m^3 , com um valor da mediana de 0,72 Mg/m^3 ;
- os valores mínimo e máximo para os fileres recuperados de calcário são respetivamente iguais a 0,53 e 0,77 Mg/m^3 , sendo o valor da mediana de 0,63 Mg/m^3 ;
- os valores obtidos para os fileres de calcário apresentam menor variação, com um valor mínimo de 0,45 Mg/m^3 e um valor máximo de 0,49 Mg/m^3 ;
- o valor observado para a cal hidratada é apenas de 0,15 Mg/m^3 ;
- a generalidade dos agregados apresentam valores, da massa volúmica aparente, superiores aos fileres a que deram origem, exceto o agregado granítico AFRG3 e o agregado calcário AFRC6;
- os fileres de calcário apresentam valores inferiores aos obtidos para os fileres recuperados de calcário;

- a concentração crítica para os fileres recuperados varia entre aproximadamente 0,2 e 0,3, tomando valores próximos de 0,2 para os fileres comerciais calcários, para o cimento e para a cal hidráulica, sendo apenas de 0,07 para a cal hidratada;
- os valores da concentração crítica obtidos neste trabalho para a cal hidratada e para o cimento Portland, diferem dos resultados obtidos por outros autores, tais como Recasens *et al.*, 2005, e Quesada *et al.*, 2013. Este aspeto significa que estes produtos podem apresentar, para diferentes origens ou produtores, variações significativas nos valores da massa volúmica e da massa volúmica aparente em querosene.

No ensaio da cal hidratada houve necessidade de reduzir a massa do provete, dada a baixa densidade do filer. Torna-se assim necessário proceder à alteração da norma de ensaio europeia, fixando não um valor para a massa do provete, mas sim para o seu volume, atendendo assim às diferentes densidades dos materiais.

De todos os documentos normativos analisados, apenas o caderno de encargos espanhol PG3 (*Ministerio de Fomento*, 2014) impõem valores limites para a massa volúmica aparente em querosene. Este documento refere que os fileres a utilizar em misturas betuminosas devem apresentar valores entre 0,5 e 0,8 Mg/m³, o que implica, para os fileres estudados neste trabalho, a exclusão de alguns fileres recuperados de granito, dos fileres comerciais calcários e da cal hidratada.

As elevadas diferenças observadas para os diferentes tipos de fileres, quer para a massa volúmica quer para a massa volúmica aparente em querosene, que se refletem nos valores da concentração crítica, aconselham que os requisitos referentes à quantidade de filer nas misturas betuminosas, nomeadamente a relação filer/betume, devam ser fixados em termos volumétricos e não em massa.

6.1.6. Vazios do filer seco compactado

A determinação dos vazios do filer seco compactado foi desenvolvida por Rigden em 1947 e é, ainda hoje, uma característica considerada por muitos autores, capaz de prever o desempenho dos fileres nas misturas betuminosas. Os investigadores Harris & Stuart chegaram mesmo a defender, em 1995, que não devem ser utilizados fileres com valores do volume de vazios Rigden fora do intervalo 34 - 39%.

Neste trabalho os ensaios foram realizados de acordo com o descrito na norma EN 1097-4 (CEN, 2008), tendo sido realizados ensaios não apenas para os fileres e

agregados que deram origem os fileres recuperados, mas também para algumas misturas de fileres.

As categorias previstas na norma de produto EN 13043 (CEN, 2002) são apresentadas na tabela 6.9.

Tabela 6.9 Categorias dos vazios de Rigden, adaptada da EN 13043 (CEN, 2002)

Categorias para os vazios de Rigden (V)	Limites inferiores e superiores para resultados individuais (%)
$V_{28/38}$	28 a 38
$V_{38/45}$	38 a 45
$V_{28/45}$	28 a 45
$V_{44/55}$	44 a 55

Os resultados obtidos nos ensaios realizados aos fileres são apresentados nas tabelas 6.10 e 6.11 e na figura 6.23.

Tabela 6.10 Valores dos vazios de Rigden dos fileres

Filer	V (%)	Filer	V (%)	Filer	V (%)	Filer	V (%)
FRG1	38,2	FRC1	35,5	FC1	29,4	Chda	59,9
FRG2	45,1	FRC2	40,0	FC2	31,2	Chca	43,7
FRG3	38,7	FRC3	37,3	FC3	28,9	Cem	36,3
FRG4	38,8	FRC4	34,4	FC4	29,0		
FRG5	41,1	FRC5	33,7	FC5	28,3		
FRG6	39,7	FRC6	40,2				
FRG7	36,2						
FRR	34,1						

Tabela 6.11 Valores dos vazios de Rigden da fração 0/0,125 mm dos agregados

Agregado (0/0,125)	V (%)	Agregado (0/0,125)	V (%)
AFRG1	35,5	AFRC1	29,0
AFRG2	39,9	AFRC2	27,3
AFRG3	39,9	AFRC4	27,4
AFRG4	39,0	AFRC5	29,8
AFRG5	39,4	AFRC6	29,2
AFRG7	36,0		
AFRR	33,5		

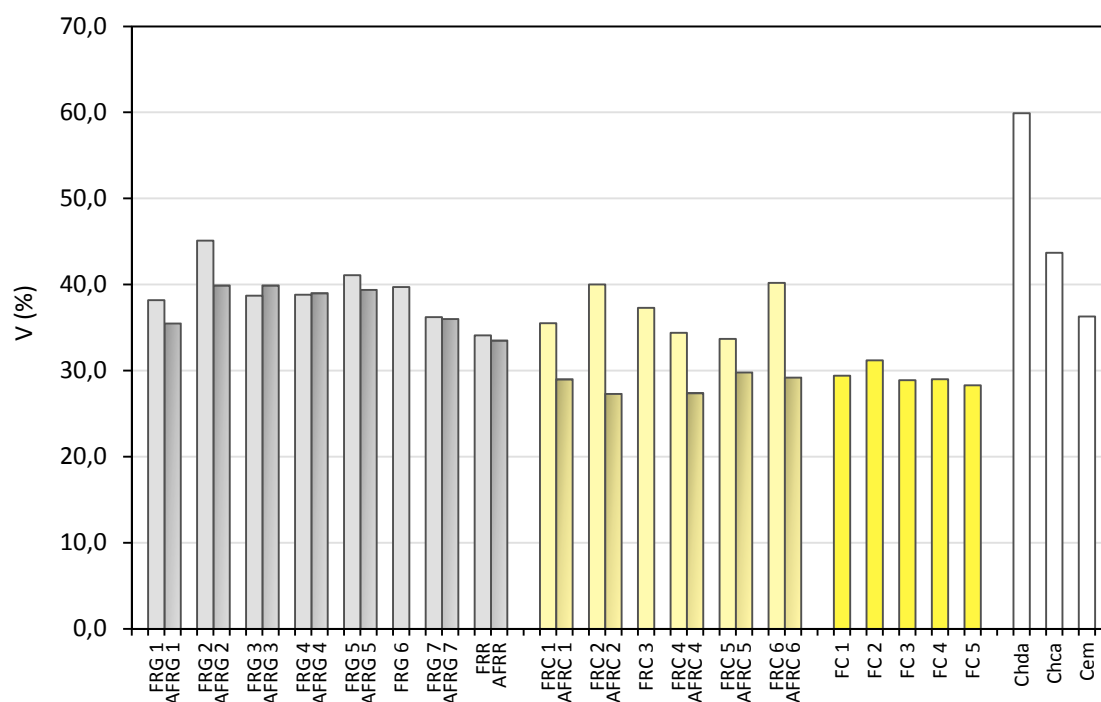


Figura 6.23 Valores dos vazios de Rigden dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

De modo a compreender como se ajustam as partículas de diferentes fileres quando misturados, nomeadamente os fileres de origem granítica com fileres comerciais, naturais e artificiais, procedeu-se à determinação dos vazios de Rigden para algumas misturas de fileres. Os valores obtidos são apresentados na tabela 6.12.

Tabela 6.12 Valores dos vazios de Rigden para diferentes misturas de fileres

Misturas de fileres (relações em massa)	V (%)	Misturas de fileres (relações em massa)	V (%)	Misturas de fileres (relações em massa)	V (%)
50% FRG1 + 50% FC2	32,1	50% FRG2 + 50% FC2	36,9	50% FRG3 + 50% FC2	30,6
50% FRG1 + 50% Chda	51,9	50% FRG2 + 50% Chda	53,3	50% FRG3 + 50% Chda	49,3
50% FRG1 + 50% Chca	39,2	50% FRG2 + 50% Chca	43,4	50% FRG3 + 50% Chca	38,8
50% FRG1 + 50% Cem	35,4	50% FRG2 + 50% Cem	40,2	50% FRG3 + 50% Cem	34,3
75% FRG1 + 25% Chda	45,3	75% FRG2 + 25% Chda	47,6	75% FRG3 + 25% Chda	41,4

A análise aos valores obtidos experimentalmente permite observar o seguinte:

- os fileres recuperados de granito apresentam valores superiores aos fileres recuperados de calcário;
- os fileres recuperados de granito e de reólito apresentam valores entre 34,1 e 45,1%, com um valor da mediana de 38,8%. Já os fileres recuperados de calcário apresentam valores mínimo e máximo, respetivamente de 33,7 e 40,2%, sendo a mediana de 36,4%;
- os fileres comerciais de calcário possuem valores entre 28,3 e 31,2%, apresentando portanto pequena variação;
- a cal hidratada apresenta o maior valor do índice de vazios Rigden (59,9%). Este valor, confirmado por um estudo de caracterização de agregados portugueses realizado pelo LNEC em 2008, está associado em parte à elevada finura do filer. O relatório NCHRP 2011 apresenta para os vazios de Rigden da cal hidratada o valor de 39%. Admite-se, no entanto, que o produto ensaiado pelo autor é significativamente diferente do estudado neste trabalho, pois apresenta um módulo de finura de 4,5, resultado este muito superior ao valor de 2,6 quantificado para a cal hidratada tratada no presente estudo;
- à exceção do filer FRG 3, os fileres recuperados apresentam valores superiores aos dos agregados que lhe deram origem, sendo a diferença mais significativa no caso dos fileres recuperados de calcário;
- os agregados de calcário apresentam valores muito semelhantes aos fileres comerciais de calcário;
- as misturas de fileres conduzem a valores dos vazios Rigden intermédios, relativamente aos valores individuais dos fileres combinados, mas não diretamente relacionáveis. Assim, os valores dos vazios de Rigden de misturas de fileres devem ser obtidos por via experimental e não através de uma ponderação dos resultados obtidos individualmente. Esta característica foi observada por outros autores e para fileres de outras origens (Quaresma & Antunes, 2002 e Grabowski *et al.*, 2009).

No relatório NCHRP de 2010 é referido que os valores dos vazios do filer seco compactado não mostram uma tendência no que diz respeito à origem mineralógica dos fileres. Esta opinião não é no entanto confirmada por Bahia, 2011, nem pelos valores observados neste trabalho, obtendo-se valores distintos para os fileres calcários e para os fileres recuperados de granito.

As disposições normativas portuguesas estabelecidas por Azevedo em 2010 para o InIR, que se encontram em fase de aprovação, definem, tal como as especificações SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes) estabelecidas no guia técnico de 2008, que os fileres a usar em misturas betuminosas devem pertencer à classe $V_{28/45}$, ficando assim excluída a cal hidratada. Já a exigência definida no Caderno de Encargos das IP, S.A., (Estradas de Portugal, 2012) é ainda mais restritiva, definindo, a exemplo das recomendações do LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées) (Delorme, *et al.*, 2007), que o filer deve pertencer à classe $V_{28/38}$. Segundo estas duas entidades, ficam assim excluídos quase todos os fileres recuperados de granito, alguns fileres recuperados de calcário, a cal hidratada e a cal hidráulica. Conclui-se assim que as exigências definidas para os vazios de Rigden, no documento contratual português atualmente em vigor, não se encontram adequadamente estabelecidas.

6.1.7. Viscosidade aparente ou número de betume

O método de ensaio descrito na norma europeia EN 13179-2 (CEN, 2000) consiste em quantificar a água necessária adicionar a 100 g de filer, de modo a obter uma amostra com uma determinada consistência, quantificada por um valor de penetração de uma agulha normalizada.

O princípio do ensaio é idêntico ao associado aos vazios do filer seco compactado. Neste ensaio a água adicionada ao filer vai ocupar os espaços deixados vazios pelas partículas sólidas, ou seja, os vazios do filer seco. A norma de produto EN 13043 (CEN, 2002) define três categorias para o número de betume, apresentadas na tabela 6.13. Refira-se, no entanto, que face à semelhança entre esta propriedade e os vazios de Rigden, as categorias para o número de betume deveriam ser idênticas, em número e valores limites, às estabelecidas para os vazios do filer seco compactado.

Tabela 6.13 Categorias do número de betume, adaptada da EN 13043 (CEN, 2002)

Categorias para o número de betume (BN)	Limites inferiores e superiores para resultados individuais
$BN_{28/39}$	28 a 39
$BN_{40/52}$	40 a 52
$BN_{53/62}$	53 a 62

Neste trabalho foram realizados ensaios do número de betume para todos os fileres, bem como para os agregados que deram origem aos fileres recuperados em central. Nas tabelas 6.14 e 6.15 e na figura 6.24 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados.

Tabela 6.14 Valores do número de betume dos fileres

Filer	BN	Filer	BN	Filer	BN	Filer	BN				
FRG1	40	FRC1	36	FC1	27	Chda	108				
FRG2	52	FRC2	44	FC2	29	Chca	46				
FRG3	39	FRC3	38	FC3	26	Cem	37				
FRG4	42	FRC4	33	FC4	25						
FRG5	43	FRC5	37	FC5	27						
FRG6	44	FRC6	37								
FRG7	37										
FRR	35										

Tabela 6.15 Valores do número de betume dos agregados que deram origem aos fileres

Agregado (0/0,125)	BN	Agregado (0/0,125)	BN
AFRG1	37	AFRC1	25
AFRG2	42	AFRC2	25
AFRG3	39	AFRC4	24
AFRG4	40	AFRC5	34
AFRG5	40	AFRC6	24
AFRG7	38		
AFRR	29		

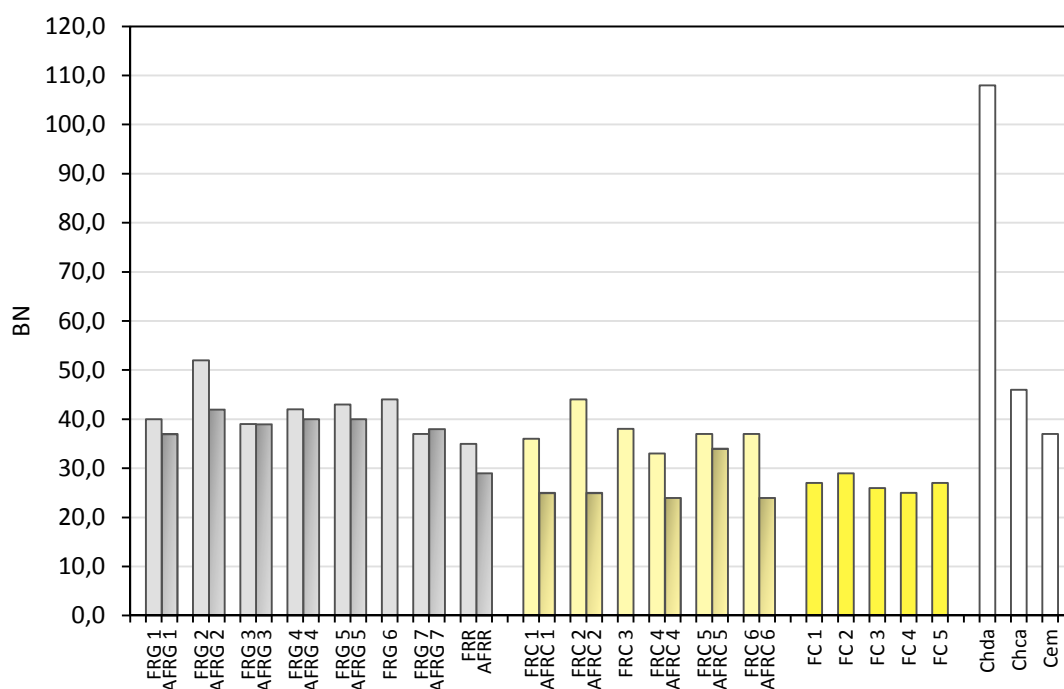


Figura 6.24 Valores do número de betume dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

A análise dos resultados obtidos permite estabelecer o seguinte:

- a cal hidratada apresenta um valor de número de betume de 108, muito superior aos valores obtidos para os restantes fileres e agregados, cujos valores variam entre 24 e 44;
- o número de betume dos fileres recuperados de calcário são tendencialmente inferiores aos observados para os fileres recuperados de granito. Os primeiros apresentam valores mínimos e máximos de 33 e 44 e uma mediana de 37, enquanto que para os fileres recuperados de granito, os valores limite são de 35 e 52, sendo a mediana de 41;
- os valores do número de betume dos agregados são inferiores aos valores obtidos para os fileres recuperados correspondentes;
- os fileres comerciais calcários apresentam pequena variação quanto ao número de betume, com valores mínimo e máximo respetivamente de 25 e 29;
- para a generalidade dos fileres comerciais de calcário, e para quase todos os agregados calcários que deram origem aos fileres recuperados de calcário, foram observados valores inferiores a 28. Estes resultados não permitem a classificação

destes produtos, em nenhuma das categorias previstas na norma de produto europeia;

- dada a semelhança entre os princípios associados aos ensaios dos vazios de Rigden e número de betume, os resultados obtidos nestes ensaios assemelham-se significativamente, pelo que as considerações apresentadas, para os resultados do ensaio de vazios Rigden, se mantêm válidas para os resultados do ensaio de número de betume.

6.1.8. Variação da temperatura anel e bola

A variação da temperatura anel e bola é uma característica dos fileres prevista na norma de produto europeia EN 13043 (CEN, 2002), encontrando-se o ensaio definido na norma de ensaio europeia EN 13179-1 (CEN, 2013).

O ensaio consiste em quantificar a diferença entre a temperatura anel e bola de um betume do tipo 70/100 e a temperatura anel e bola de um mástique, obtido pela adição do filer ao mesmo betume. A taxa de incorporação volumétrica dos dois materiais é de 37,5% de filer e 62,5% de betume, ou seja, uma relação volumétrica filer/betume de 0,6, ou filer/mástique betuminoso de 0,375.

O objetivo do ensaio é o de avaliar o efeito rigidificante do filer, e a norma de produto prevê quatro categorias para esta característica de acordo com a tabela 6.16.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados aos fileres e a alguns agregados que deram origem a fileres recuperados são apresentados nas tabelas 6.17 e 6.18 e na figura 6.25.

Tabela 6.16 Categorias para a variação da temperatura anel e bola, adaptada da EN 13043 (CEN, 2002)

Categorias para a variação da temperatura anel e bola	Variação da temperatura anel e bola (°C)
$\Delta_{R\&B}$ 8/16	8 a 16
$\Delta_{R\&B}$ 17/25	17 a 25
$\Delta_{R\&B}$ 8/25	8 a 25
$\Delta_{R\&B}$ 25	> 25

Tabela 6.17 Valores da variação da temperatura anel e bola dos fileres

Filer	$\Delta_{R\&B}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Filer	$\Delta_{R\&B}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Filer	$\Delta_{R\&B}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Filer	$\Delta_{R\&B}$ ($^{\circ}\text{C}$)
FRG1	21,2	FRC1	14,8	FC1	11,4	Chda	(*)
FRG2	33,0	FRC2	15,0	FC2	12,4	Chca	21,9
FRG3	21,5	FRC3	14,6	FC3	12,8	Cem	13,6
FRG4	20,2	FRC4	11,8	FC4	10,0		
FRG5	24,0	FRC5	9,2	FC5	9,0		
FRG6	23,8	FRC6	19,6				
FRG7	18,6						
FRR	14,5						

(*) Não é possível produzir o mástique

Tabela 6.18 Variação da temperatura anel e bola da fração 0/0,125 mm de alguns agregados que deram origem a fileres recuperados

Agregado (0/0,125)	$\Delta_{R\&B}$ (°C)	Agregado (0/0,125)	$\Delta_{R\&B}$ (°C)
AFRG2	22,2	AFRC5	11,6
AFRG7	21,2	AFRC6	9,2

Por forma a entender de que forma a mistura de fileres pode fazer variar esta característica, foram realizados ensaios a duas misturas de fileres. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.19.

Tabela 6.19 Variação da temperatura anel e bola de misturas de fileres

Mistura de fileres (proporções em massa)	$\Delta_{R\&B}$ (°C)
50% FRG1 + 50% Chca	19,6
50% FRG2 + 50% Chca	26,6

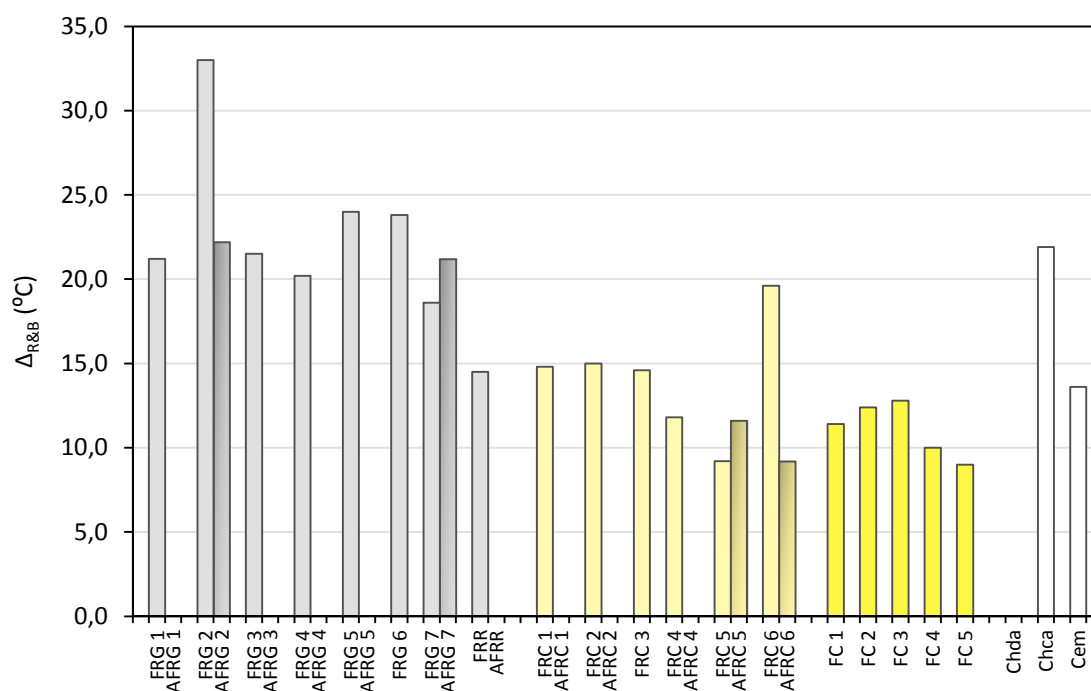


Figura 6.25 Variação da temperatura anel e bola dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

Face aos resultados obtidos nos ensaios é possível estabelecer as seguintes observações:

- os fileres recuperados de granito apresentam valores da variação de temperatura anel e bola, superiores aos obtidos nos fileres recuperados de calcário. Os primeiros apresentam valores limites de 18,6 e 33,0 °C e uma mediana de 21,4 °C, enquanto que os fileres recuperados de calcário apresentam valores mínimo e máximo respetivamente de 9,2 e 19,6 °C, e uma mediana de 14,7 °C;
- os valores observados, no caso dos fileres comerciais calcários, apresentam pequena variação, com valores mínimo e máximo respetivamente de 9,0 e 12,8 °C;
- a variação da temperatura anel e bola apresenta, para o caso da mistura de fileres, valores intermédios aos valores observados para os fileres de forma individual. Também esta conclusão é apresentada por Grabowski *et al.*, 2009, em que foram ensaiadas várias composições volumétricas, para várias misturas de diferentes fileres minerais com cal hidratada, observando-se para todos os fileres ensaiados, um aumento da variação da temperatura anel e bola, com o aumento da dosagem da cal hidratada na mistura.

As disposições normativas portuguesas do I.P., S.A, as recomendações estabelecidas pelo InIR, segundo Azevedo, 2010, pelos Espanhois no guia SETRA de 2008 e pelos Franceses do LCPC segundo Delorme *et al.* 2007, exigem que o filer a utilizar no fabrico de misturas betuminosas pertença à classe $\Delta_{R\&B}$ 8/16. De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, apenas os fileres comerciais de calcário, o cimento e alguns fileres recuperados de calcário poderiam ser utilizados no fabrico de misturas betuminosas, ficando vedada a utilização de todos os restantes fileres, nomeadamente a cal hidráulica, filer que tem grande utilização em Portugal. Torna-se pois necessário alterar as disposições normativas portuguesas, quanto aos limites a observar pelos fileres, no que diz respeito à variação da temperatura anel e bola.

6.1.9. Superfície específica do filer

A superfície específica dos fileres foi determinada pelo método de Blaine, conforme previsto na EN 13043 (CEN, 2002), para todos os fileres e agregados que deram origem aos fileres recuperados. O método de ensaio encontra-se descrito na EN 196-6 (CEN, 2010). Não foi considerada necessária a quantificação desta característica para misturas de fileres, dado que, a superfície específica de misturas de materiais granulares, é a média ponderada dos valores da superfície específica de cada uma das amostras que constituem a mistura.

Nas tabelas 6.20 e 6.21 e figura 6.26 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados para os fileres e para a fração 0/0,125 mm dos agregados.

Tabela 6.20 Valores da superfície específica (Blaine) dos fileres

Filer	S (cm ² /g)	Filer	S (cm ² /g)	Filer	S (cm ² /g)	Filer	S (cm ² /g)				
FRG1	5038	FRC1	4455	FC1	5623	Chda	13636				
FRG2	4102	FRC2	6790	FC2	6082	Chca	6141				
FRG3	1890	FRC3	5911	FC3	5399	Cem	5150				
FRG4	2855	FRC4	4964	FC4	5868						
FRG5	2946	FRC5	3218	FC5	6263						
FRG6	3554	FRC6	2757								
FRG7	3122										
FRR	3581										

Tabela 6.21 Valores da superfície específica (Blaine) dos agregados que deram origem aos fileres recuperados

Agregado (0/0,125)	S (cm ² /g)	Agregado (0/0,125)	S (cm ² /g)
AFRG1	2972	AFRC1	2743
AFRG2	1403	AFRC2	3430
AFRG3	1859	AFRC4	3510
AFRG4	1415	AFRC5	2872
AFRG5	2178	AFRC6	4579
AFRG7	1423		
AFRR	3437		

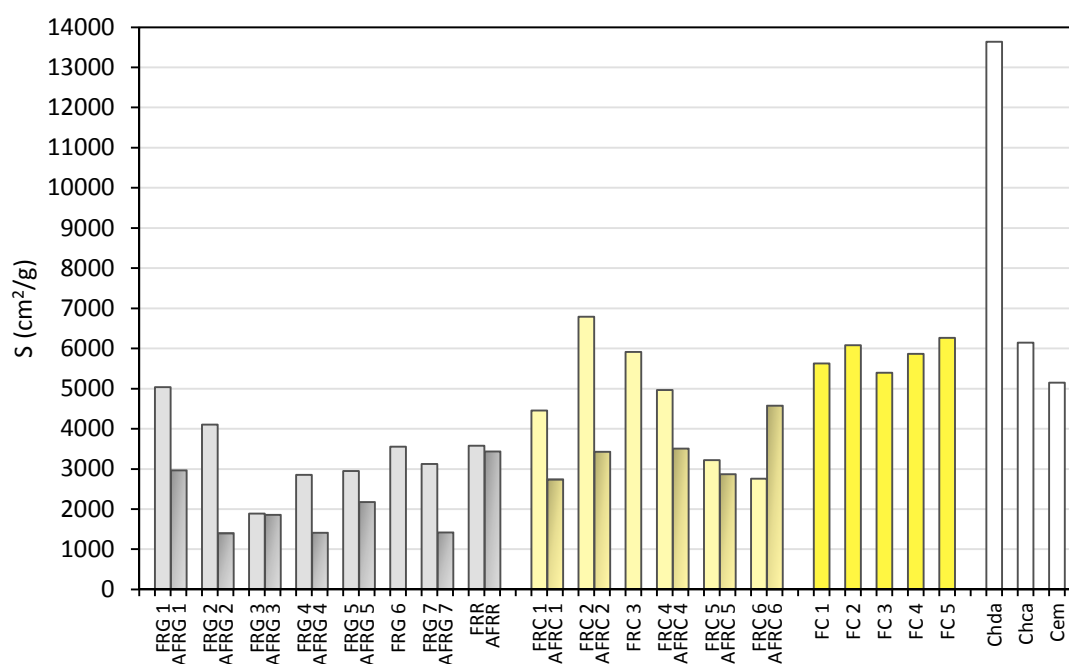


Figura 6.26 Valores da superfície específica dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

Os resultados dos ensaios permitem estabelecer os seguintes comentários:

- os valores da superfície específica dos fileres recuperados de calcário são superiores aos observados nos fileres recuperados de granito. Os valores máximos e mínimos observados para estes tipos de amostras foram de 1890 e 5038 g/cm³

para os graníticos e de 2757 e 6790 g/cm³ para os calcários, sendo de 3338 e 4710 g/cm³ os repetitivos valores da mediana;

- a superfície específica dos fileres recuperados em central é mais elevada do que a fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem, exceção para o filer FRC6. No entanto, o resultado obtido neste filer pode ser justificado, pelo menos em parte, pela sua granulometria, que, como já referido anteriormente, é demasiado grosseira;
- os fileres comerciais de calcário apresentam valores muito idênticos entre si, com um valor mínimo de 5 399 e um valor máximo de 6 263 cm²/g;
- a cal hidratada possui uma superfície específica muito elevada, praticamente o dobro do valor mais elevado dos restantes fileres;
- estes dois últimos pontos confirmam que a superfície específica de um material granular se relaciona, em parte, com a granulometria das partículas que o constituem.

De referir, por fim, que ao valor da superfície específica de um filer deve ser sempre associada a metodologia de ensaio utilizada. Na realidade, esta mesma característica avaliada através de outro tipo de ensaio, por exemplo por adsorção gasosa, conduz a valores significativamente diferentes dos apresentados pelo método de Blaine. Estão neste caso os fileres em que as partículas apresentam elevada porosidade aberta ao exterior, como é o caso da cal hidratada.

6.1.10. Solubilidade em água

A metodologia seguida para quantificar a solubilidade de um filer em água encontra-se descrita na norma EN 1744-1 (CEN, 2009). Como já referido no capítulo 3, esta metodologia não é aplicável a fileres com características hidráulicas, ou solúveis em água, pelo que não se aplica aos fileres Cem, Chda e Chca. Todos os restantes fileres utilizados neste estudo foram obtidos por britagem e moagem de rochas sãs, pelo que se admitiu, de início, que estes materiais não contêm material solúvel em água.

De modo a confirmar esta hipótese foram realizados ensaios, segundo a referida norma europeia, para dois fileres calcários, FC1 e FC2, e três fileres recuperados de central, um calcário, FRC1 e dois graníticos, FRG1 e FRG2. Os valores da solubilidade em água obtidos foram 2,1 e 2,7%, respetivamente para os fileres FC1 e FC2, 1,2 e 1,5 % para

os fileres recuperados de granito FRG1 e FRG2, e inferior a 0,1 % para o filer recuperado calcário.

Os valores muito baixos dos resultados obtidos permitiram concluir que esta característica não é identificadora do comportamento do filer, não sendo pois possível, através dos resultados obtidos, distinguir qualquer propriedade dos fileres estudados. Assim, não só não foram realizados os ensaios aos restantes fileres, como os resultados obtidos para os fileres ensaiados não foram considerados na análise e estabelecimento de conclusões no presente trabalho.

Refira-se ainda que a norma EN 13043 (CEN, 2002) prevê apenas uma categoria para esta característica, WS_{10} , para os fileres com uma percentagem de material solúvel em água inferior a 10%.

6.1.11. Suscetibilidade à água

A avaliação da suscetibilidade dos fileres à água é determinada de acordo com o descrito na norma de ensaio EN 1744-4 (CEN, 2005). Também para este ensaio se procurou validar inicialmente a metodologia, para um pequeno número de fileres, por se entender que face à origem dos fileres, as amostras não seriam suscetíveis de apresentar suscetibilidade à água.

Assim, foram realizados ensaios segundo a referida norma europeia, para os mesmos fileres estudados na solubilidade em água e ainda para a cal hidráulica e cal hidratada. Para nenhum dos mástiques produzidos se verificou vestígios de filer removido pela água durante o ensaio. Assim, também para este ensaio, não foi considerado necessário a sua realização, pois os resultados obtidos não permitem distinguir os diferentes tipos de filer.

6.1.12. Argilosidade do filer – Ensaio do azul de metileno

A determinação do valor azul de metileno (MB_F) deve ser realizada de acordo com o anexo A da norma europeia EN 933-9 (CEN, 2009).

A norma de produto EN 13043 prevê duas categorias para esta característica, MB_{F10} e MB_{F25} , para fileres com valores azul de metileno respetivamente inferiores a 10 e a 25 g/kg.

Como já referido, os fileres naturais ensaiados são de origem mineral, resultantes da britagem ou britagem e moagem de rocha sã, de origem granítica e calcária, pelo que

não possuem na sua constituição materiais argilosos e, por esta razão, este ensaio não é adequado a este tipo de materiais. De qualquer modo, e como forma de validar esta hipótese, foram realizados ensaios sobre algumas amostras de fileres comerciais calcários e fileres recuperados de granito e de calcário, os mesmos utilizados nos ensaios de solubilidade em água e suscetibilidade à água. Pelas mesmas razões apresentadas no caso do ensaio de solubilidade em água, também para o ensaio de azul de metileno não foram considerados os fileres com características hidráulicas.

Nos ensaios realizados obtiveram-se valores de MB_F inferiores a 5 g de corante por quilograma de filer. Considerou-se assim que este ensaio não é diferenciador de qualquer propriedade dos materiais ensaiados e não foi considerado no estudo.

6.1.13. Determinação do pH da suspensão do filer em água

O valor do pH, de uma dispersão de um sólido em água, é normalmente utilizado como indicador do grau de atividade desse sólido. No entanto, no caso dos fileres para uso em misturas betuminosas não está prevista, na normalização europeia, a determinação do pH. Assim, neste trabalho, esta característica foi quantificada segundo o procedimento descrito na norma ISO 787-9 (1981). Foram realizados ensaios para todos os fileres em estudo e agregados que deram origem aos fileres recuperados. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados nas tabelas 6.22 e 6.23 e figura 6.27.

Tabela 6.22 Valores do pH da dispersão dos fileres em água

Filer	pH	Filer	pH	Filer	pH	Filer	pH		
FRG1	9,1	FRC1	12,2	FC1	10,5	Chda	12,2		
FRG2	7,9	FRC2	12,1	FC2	9,3	Chca	12,2		
FRG3	7,6	FRC3	12,2	FC3	9,0	Cem	12,4		
FRG4	7,9	FRC4	12,2	FC4	8,5				
FRG5	7,7	FRC5	12,4	FC5	8,3				
FRG6	9,6	FRC6	12,3						
FRG7	7,0								
FRR	9,5								

Tabela 6.23 Valores do pH da dispersão dos agregados em água

Agregado (0/0,125)	pH	Agregado (0/0,125)	pH
AFRG1	9,6	AFRC1	8,6
AFRG2	8,7	AFRC2	8,6
AFRG3	8,6	AFRC4	8,6
AFRG4	8,6	AFRC5	8,5
AFRG5	8,1	AFRC6	8,4
AFRG7	8,7		
AFRR	8,7		

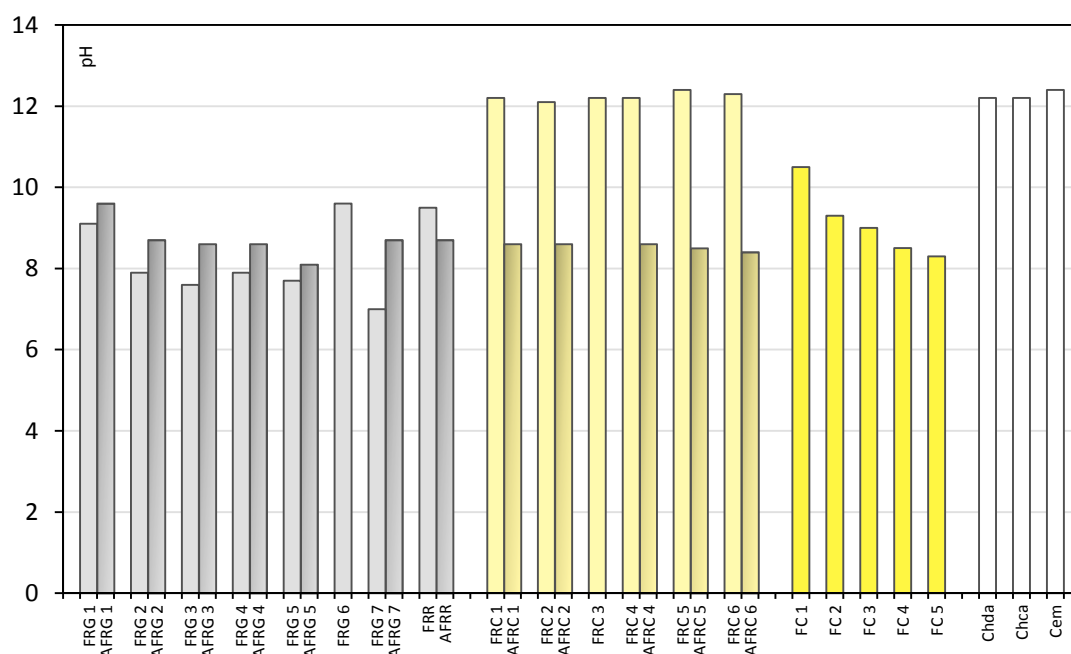


Figura 6.27 Valores do pH dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

Os resultados obtidos nos ensaios permitem estabelecer os seguintes comentários:

- Verificou-se, para todos os fileres ensaiados, que o valor do pH da dispersão do fileres em água aumentou relativamente ao pH da água utilizada na dispersão, observando-se aumentos mais significativos para os fileres hidrófilos, de origem calcária, com forte presença do elemento cálcio. Este aspeto reforça a ideia de não ser correta a classificação dos agregados em ácidos e básicos, devendo esta propriedade ser referida em termos relativos e não de forma absoluta;

- no caso dos agregados graníticos verifica-se que os fileres recuperados possuem, de uma forma geral, um valor pH ligeiramente inferior ao valor do pH dos agregados que lhes deram origem. Este facto pode ser explicado pela mesma razão indicada para a diminuição do valor da massa volúmica dos materiais. Na realidade, os dois materiais são diferentes em termos mineralógicos, observando-se no filer recuperado de central, uma maior percentagem dos minerais menos densos;
- para os materiais calcários, os fileres recuperados apresentam valores pH muito superiores aos valores observados na fração 0/0,125 mm dos agregados que deram origem aos fileres recuperados. A justificação deve-se à alteração química observada pelo filer recuperado, quando o agregado passa junto do queimador da central, sofrendo um acentuado aumento de temperatura, que conduz à sua descarbonatação e consequente formação de óxidos de cálcio, com características acentuadamente básicas.

Por forma a comprovar esta hipótese, foi realizado o ensaio de determinação do pH, sobre uma amostra do material de dimensão inferior a 0,125 mm do agregado AFRC6, após exposição da amostra a uma temperatura de 700 °C durante 10 min. O valor do pH obtido para esta amostra foi de 11,8, valor superior a 8,4 obtido no agregado AFRG6 e inferior a 12,3, obtido para o filer recuperado FRC6. O facto do pH não ter atingido o valor observado para o filer recuperado, pode significar que a exposição à temperatura, a que foi submetido o agregado em laboratório, foi inferior à observada na central de misturas betuminosas, observando-se na simulação realizada uma menor descarbonatação da amostra.

6.1.14. Avaliação dos elementos químicos presentes

Para a avaliação dos elementos químicos presentes nas amostras foi utilizado um equipamento de espectrometria de fluorescência de raios X, portátil, e o método de ensaio descrito na norma americana ASTM D5381-14 (2014).

Nas tabelas 6.24 e 6.25 e figuras 6.28 e 6.29 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados, apenas no que diz respeito aos elementos maioritários em presença, ou seja, o cálcio (Ca) e o silício (Si).

Tabela 6.24 Valores dos elementos Ca e Si presentes nos fileres

Filer	Si	Ca	Filer	Si	Ca	Filer	Si	Ca	Filer	Si	Ca			
FRG1	65	3	FRC1	8	81	FC1	1	92	Chda	1	94			
FRG2	61	4	FRC2	6	85	FC2	1	92	Chca	7	84			
FRG3	72	2	FRC3	14	79	FC3	1	90	Cem	1	65			
FRG4	66	3	FRC4	6	87	FC4	1	95						
FRG5	66	2	FRC5	7	87	FC5	2	92						
FRG6	61	6	FRC6	4	89									
FRG7	71	1												
FRR	69	2												

Tabela 6.25 Valores dos elementos Ca e Si dos agregados que deram origem aos fileres recuperados

Filer	Si	Ca	Filer	Si	Ca
AFRG1	67	3	AFRC1	6	87
AFRG2	66	4	AFRC2	3	91
AFRG3	71	1	AFRC4	3	92
AFRG4	71	3	AFRC5	3	85
AFRG5	70	2	AFRC6	2	90
AFRG7	73	1			
AFRR	70	2			

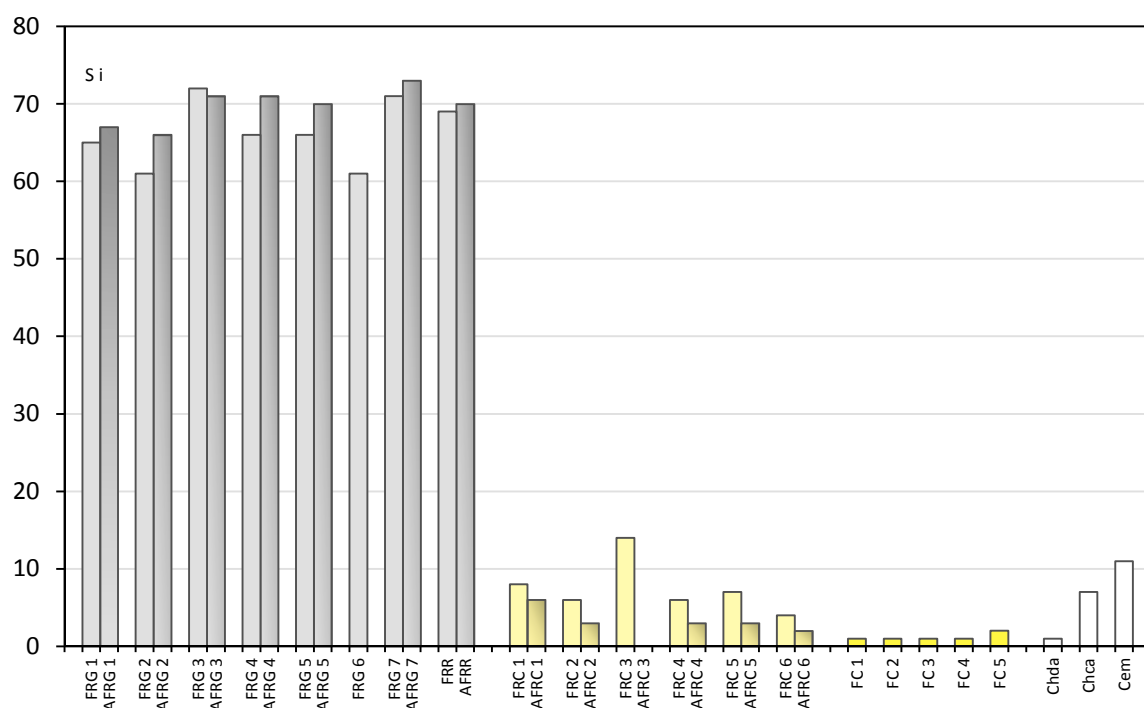


Figura 6.28 Valores de Si dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

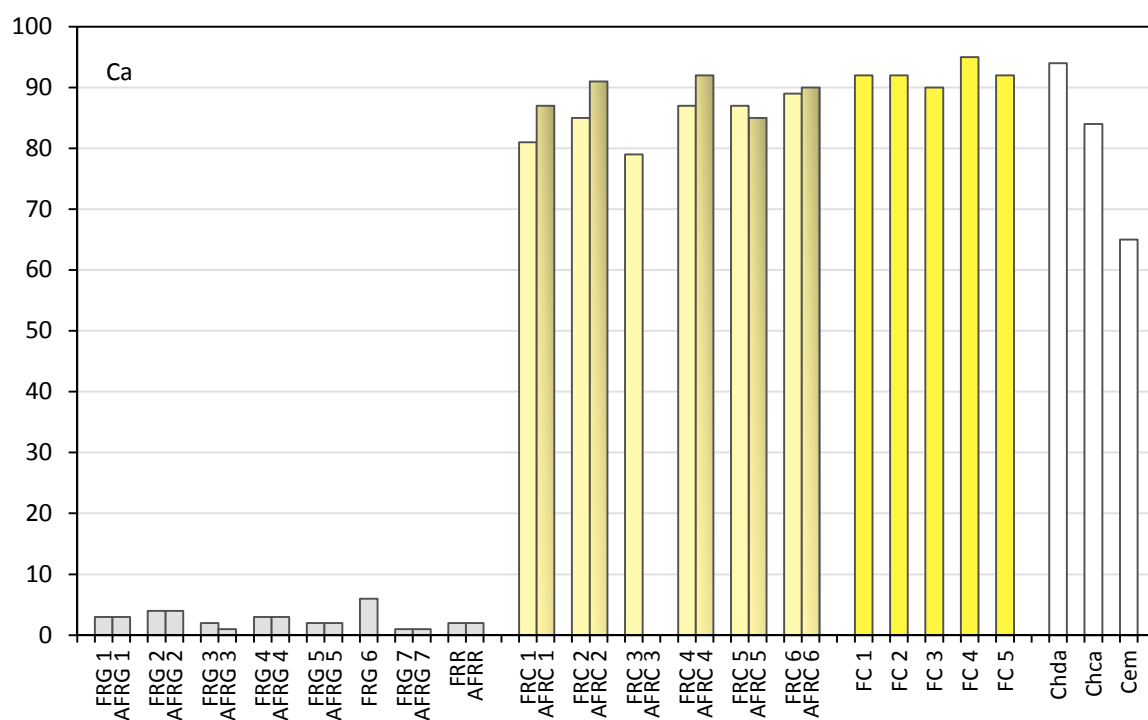


Figura 6.29 Valores de Ca dos fileres e da fração 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem

Realizou-se ainda o ensaio sobre a amostra de material de dimensões inferiores a 0,125 mm do agregado AFR6, exposto durante 10 min a uma temperatura de 700 °C,

conforme anteriormente referido. Os valores obtidos no ensaio de fluorescência de raio X para esta amostra foram de 89 e 1%, respetivamente para o cálcio e o silício. Estes valores são iguais aos valores obtidos no filer recuperado FRC6, aspeto que confirma a hipótese de os materiais calcários sofrerem alteração química quando passam junto ao queimador da central, resultando fileres recuperados quimicamente distintos dos agregados que lhes deram origem.

Os resultados obtidos nos ensaios permitem estabelecer os seguintes comentários:

- os fileres recuperados de calcário apresentam menores valores do elemento cálcio e valores mais elevados do elemento silício, relativamente aos agregados que lhes deram origem. Este aspeto pode ser justificado, não só pela provável presença de partículas de diferentes origens geológicas nos fileres recuperados, mas também pela alteração química observada pelos fileres recuperados, pela passagem no queimador da central de produção das misturas betuminosas;
- os valores relativos dos elementos silício e cálcio obtidos para a cal hidratada, cal hidráulica e cimento estão de acordo com o esperado, face aos processos industriais utilizados no fabrico destes produtos.

6.1.15. Conclusões sobre os resultados dos ensaios dos fileres

Neste trabalho foram quantificadas as características mais relevantes para um número alargado de fileres, artificiais e naturais e de várias origens geológicas, todos eles habitualmente utilizados em Portugal, através da realização de 372 ensaios referidos na tabela 6.26.

Tabela 6.26 Número de ensaios realizados aos fileres selecionados no estudo

Identificação do ensaio	Nº ensaios	Identificação do ensaio	Nº ensaios
Granulometria por peneiração	34	Variação da temperatura anel e bola	28
Granulometria por difração laser	22	Superfície específica	34
Observação microscopia	18	Solubilidade em água	5
Massa volúmica	34	Suscetibilidade à água	5
Massa volúmica aparente	34	Azul de metileno	5
Vazios de Rigden	49	pH	35
Número de betume	34	Fluorescência raios-X	35

Na tabela 6.27 são apresentados, por tipo de filer, os resultados dos ensaios mais representativos.

Tabela 6.27 Principais características da fração 0/0,125 mm dos fileres ensaiados

Propriedade	Método de ensaio	Unid.	Chda	Chca	Cem	FC	FRG	FRC
Módulo de finura	---	---	2,6	4,1	3,9	3,3 - 3,8	4,9 - 5,7	3,6 - 5,3
Massa volúmica	EN 196-6	Mg/m ³	2,24	2,70	3,06	2,72 - 2,74	2,60 - 2,68	2,69 - 2,71
Massa volúmica aparente	EN 1097-3	Mg/m ³	0,15	0,51	0,56	0,45 - 0,50	0,67 - 0,84	0,53 - 0,77
Superfície específica	EN 13043	cm ² /g	13636	6141	5150	5399-6263	2855-5038	2757-6790
Vazios de Rigden	EN 1097-4	%	59,9	43,7	36,3	28,3 - 31,2	36,2 - 45,1	33,7 - 40,2
Nº betume	EN 13179-2	---	108	46	37	25 - 29	37 - 52	33 - 44
Variação da temperatura anel e bola	EN 13179-1	°C	---	21,9	13,6	9,0 - 12,8	18,6 - 33,0	9,2 - 19,6
pH	ISO 787/9	---	12,2	12,2	12,4	8,3 - 10,5	7,0 - 9,6	12,1 - 12,4

A análise aos valores apresentados na tabela permite estabelecer as seguintes conclusões:

- a cal hidratada é um filer com propriedades muito distintas dos restantes fileres ensaiados, apresentando elevada finura, baixa massa volúmica e elevada percentagem de vazios Rigden;
- no que diz respeito aos fileres minerais, os fileres comerciais calcários e os fileres recuperados de granito apresentam, para as propriedades físicas e geométricas, valores extremos, enquanto que os fileres recuperados de calcário apresentam, para as mesmas características, valores intermédios. Assim, os fileres comerciais de calcário, quando comparados com os restantes fileres minerais, apresentam menor módulo de finura, maior massa volúmica, menor massa volúmica aparente, maior superfície específica, menor percentagem de vazios Rigden e menores valores do número de betume e da variação da temperatura anel e bola;

- os fileres comerciais de calcário apresentam pequena dispersão de valores, no que diz respeito à quantificação das suas características físicas e químicas. Este aspeto associado ao facto de apenas estes fileres apresentarem uma distribuição granulométrica bimodal, torna este tipo de filer significativamente diferente dos restantes tipos de fileres;
- face às diferenças químicas observadas entre os fileres recuperados e as frações 0/0,125 mm dos agregados que lhes deram origem, entende-se que os fileres recuperados em central devem ser definidos, não como fileres naturais, mas sim, como fileres artificiais;
- os fileres calcários e artificiais apresentam, contrariamente aos agregados graníticos, forte atração entre partículas, dadas as forças Van der Waals que se geram em maior número e intensidade, devido à composição química e elevada finura das amostras. Esta característica pode originar, durante o processo de fabrico das misturas betuminosas, uma menor dispersão daqueles tipos de fileres.

Com o objetivo de obter relações de dependência entre as diferentes propriedades dos fileres, foi efetuada uma análise estatística preliminar de forma a averiguar o comportamento das variáveis a correlacionar. Na análise descritiva foram calculadas a média, a mediana, a moda, o desvio padrão e a variância para todo o universo de resultados.

Para as várias variáveis, consideraram-se os histogramas das distribuições amostrais e as caixas-de-bigodes, sendo que estas permitem uma visualização simples da existência de valores “*outliers*”, severos ou moderados, e analisar individualmente se estes valores devem ser ignorados ou considerados na análise.

Foi efetuado um estudo sobre as relações estatísticas entre as variáveis em estudo, determinando-se para tal o coeficiente de correlação de Pearson entre alguns pares de variáveis. Para concluir o objetivo proposto, foi efetuada uma análise de regressão, sendo esta uma metodologia estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis quantitativas, de tal forma que podem ser feitas estimativas para uma variável a partir da outra ou outras.

Existem diversos métodos que permitem ajustar matematicamente a equação que relaciona duas ou mais variáveis. Um dos métodos de ajustamento mais utilizado é o método dos mínimos quadrados, sendo o método utilizado neste trabalho.

A análise dos resultados evidenciou a existência de forte correlação positiva apenas para as variáveis, vazios do filer seco compactado e o número de betume (figura 6.30),

apresentando adequado valor para o coeficiente de determinação. Este comportamento era já previsível, dado que, como já referido, se tratam de duas metodologias que, apesar de distintas, permitem a obtenção de um mesmo parâmetro. Resultados experimentais obtidos por outros autores (NCHRP, 2010) apresentam igualmente boa correlação entre estas duas propriedades.

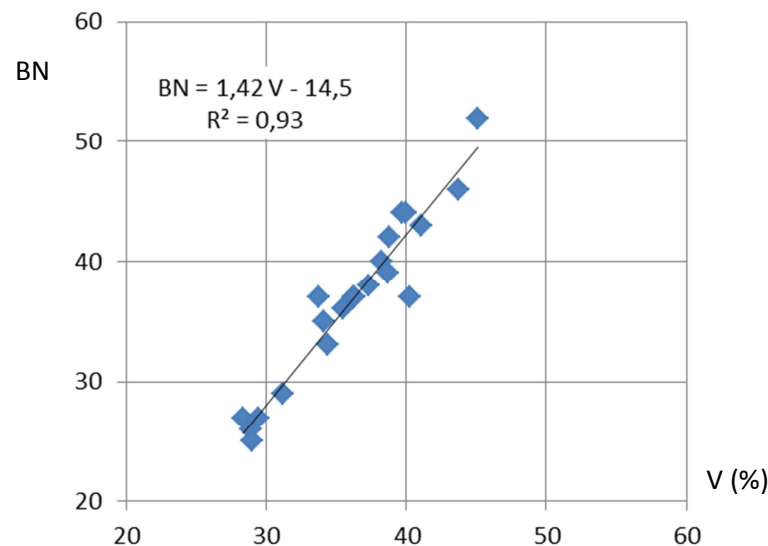


Figura 6.30 Relação entre os valores dos vazios de Rigden e do número de betume dos fileres

Alguns autores apresentam uma expressão [6.7] que relaciona os valores da variação da temperatura anel e bola e os vazios de Rigden, em função da concentração do filer no mástique. A aplicação desta expressão para a concentração de 0,6, utilizada nos ensaios da variação da temperatura anel e bola realizados neste trabalho, permitiu obter os resultados constantes na tabela 6.28, onde são apresentados igualmente os valores obtidos experimentalmente.

$$\left(\frac{f}{b}\right)_v = \frac{(100 - V) * \Delta_{R\&B}}{1021,2 + \Delta_{R\&B} * V} \quad [6.7]$$

Em que:

$\left(\frac{f}{b}\right)_v$ - Relação volumétrica filer/betume.

A figura 6.31 apresenta estes mesmos valores em gráfico, tornando evidente que a expressão não é aplicável para este valor da concentração do filer.

Tabela 6.28 Valores da temperatura anel e bola obtidos de forma experimental e analiticamente

Filer	$\Delta R\&B$ (°C) experimental	$\Delta R\&B$ (°C) expressão [6.7]	Filer	$\Delta R\&B$ (°C) experimental	$\Delta R\&B$ (°C) expressão [6.7]
FRG1	21,2	15,8	Chda	----	147,3
FRG2	> 33,0	22,0	Chca	21,9	20,4
FRG3	21,5	16,1	Cem	13,6	14,6
FRG4	20,2	16,2			
FRG5	24,0	17,9			
FRG6	23,8	16,8			
FRG7	18,6	14,6			
FRR	14,5	13,5			
FRC1	14,8	14,2	FC1	11,4	11,6
FRC2	15,0	17,0	FC2	12,4	12,2
FRC3	14,6	15,2	FC3	12,8	11,4
FRC4	11,8	13,6	FC4	10,0	11,4
FRC5	9,2	13,3	FC5	9,0	11,2
FRC6	19,6	17,2			

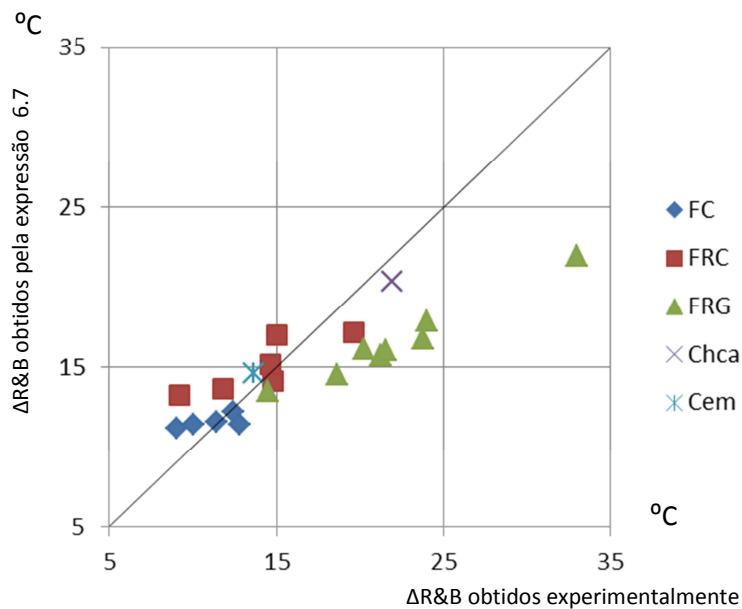


Figura 6.31 Relação entre os valores da temperatura anel e bola obtidos de forma experimental e analiticamente

Os valores da variação da temperatura anel e bola e os valores dos vazios Rigden não só não se relacionam linearmente, como não apresentam entre si qualquer tipo de correlação, conforme evidenciado na figura 6.32. No entanto, observa-se que fileres que apresentam maior valor dos vazios Rigden tendem a apresentar temperatura anel e bola mais elevada.

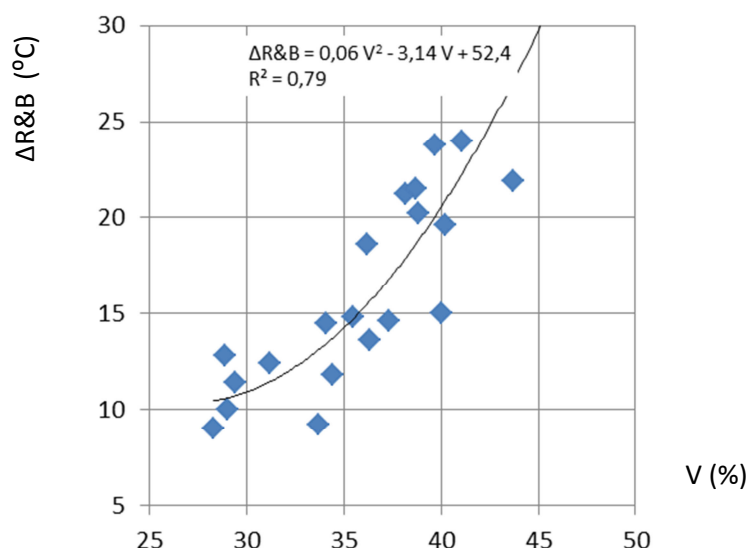


Figura 6.32 Relação entre os valores de variação da temperatura anel e bola e os vazios de Rigden

Do estudo realizado podem ainda ser estabelecidas as seguintes conclusões:

- apesar de não ser possível estabelecer adequada correlação entre a superfície específica do filer e a variação da temperatura anel e bola, verifica-se que, tendencialmente, fileres mais finos apresentam valores mais elevados de variação da temperatura anel e bola, aspeto já referido por Pearce em 2004;
- pelo facto de os valores da variação da temperatura anel e bola não serem correlacionáveis com qualquer outra propriedade do filer, para além do número de betume, pode concluir-se que o efeito rigidificante do filer no mástique é função não apenas de uma, mas sim de várias características do filer, como sejam, geométricas, físicas, mecânicas e químicas;
- a parte experimental deste trabalho permitiu concluir da necessidade de rever as normas europeias de ensaio, nomeadamente no que diz respeito à massa dos provetes a ensaiar, por forma a atender a produtos de diferentes densidades;

- também a norma europeia de produto necessita de correção, incluindo novas classes para algumas das propriedades avaliadas, garantindo que todos os produtos, com características adequadas para a utilização em misturas betuminosas, possam ser classificados;
- deveria ser ainda considerada a necessidade de uma nova norma europeia de ensaio, que permita estabelecer um procedimento sobre as propriedades percetíveis, por forma a identificar os fileres recuperados com contaminações provenientes do processo de fabrico das misturas betuminosas. Os resultados desta avaliação deveriam acompanhar os resultados de todos os ensaios de avaliação das propriedades dos fileres;
- dado que os ensaios para quantificação dos vazios de Rigden e do número de betume conduzem a valores que apresentam muito boa correlação entre si, sugere-se, para a caracterização dos fileres, que apenas um destes ensaios seja considerado na norma europeia EN 13043. Assim, deve ser eliminada a quantificação do número de betume, mantendo a norma, a exigência da quantificação dos vazios do filer seco compactado. A opção por este método justifica-se, pois, para além de mais simples e rápido, apresenta não só menor influência por parte do operador, mas também menores valores de repetibilidade e reprodutibilidade, conforme referido nas respetivas normas de ensaio.

Na seleção dos fileres, a utilizar no estudo dos mástiques betuminosos, foram excluídos os fileres recuperados que se apresentavam contaminados, e o filer comercial cuja granulometria não cumpria com os requisitos normativos.

Os fileres recuperados foram selecionados em função dos resultados obtidos experimentalmente, procurando os materiais em que observaram valores limites para as propriedades mais relevantes. Deste modo, foram selecionados os fileres recuperados de calcário FRC1, FRC5 e FRC6 e os fileres recuperados de granito FRG1, FRG3, FRG5 e FRG7.

Foram mantidos os três fileres artificiais, e no caso dos fileres comerciais de calcário, dado que as propriedades quantificadas apresentam pequena variação, à exceção da granulometria, optou-se por selecionar apenas um deles, o filer FC1, por apresentar uma granulometria intermédia e por ser o de uso mais generalizado em Portugal.

6.2. Ensaio em betumes e mástiques betuminosos

6.2.1. Betumes

Neste trabalho foram selecionados dois betumes distintos de utilização corrente em Portugal: um betume de pavimentação 35/50, produzido pela GALP na refinaria de Matosinhos, e um betume modificado com polímeros PMB 45/80-60, proveniente da fábrica da CEPSA em Matosinhos. Pretendeu-se com esta seleção utilizar os dois tipos de betumes que maior utilização têm em Portugal, o betume 35/50 no fabrico de misturas betuminosas densas do tipo betão betuminoso (*Asphalt Concrete, AC*) e o betume modificado PMB 45/80-60, utilizado em misturas betuminosas do tipo drenante (*Porous Asphalt, PA*).

Para os betumes foram inicialmente realizados ensaios de penetração e de temperatura anel e bola, respetivamente, segundo as normas EN 1426 (CEN, 2015) e EN 1427 (CEN, 2015). Durante a execução do trabalho, foram realizados outros ensaios, como a avaliação da viscosidade dinâmica, envelhecimento, rigidez e ângulo de fase, sendo os valores obtidos apresentados juntamente com os ensaios realizados aos mástiques betuminosos.

Na tabela 6.29 são apresentados, de forma resumida, os resultados obtidos nos ensaios de penetração e temperatura anel e bola, para diferentes estados de envelhecimento do betume bem como os valores do índice de penetração dos ligantes.

Tabela 6.29 Propriedades gerais dos betumes 35/50 e PMB 45/80-60

Propriedade	Método de ensaio	Unid.	35/50	PMB 45/80-60
Penetração	EN 1426	0,1 mm	40,1	50,0
Temperatura anel e bola	EN 1427	°C	51,0	63,4
Índice de penetração	EN 12591	---	-1,47	1,64
Temperatura anel e bola após 5h PAV	EN 14769 e EN 1427	°C	55,4	71,2
Temperatura anel e bola após 5h + 20h PAV	EN 14769 e EN 1427	°C	62,8	91,4

6.2.2. Mástiques betuminosos

Com os ensaios realizados aos mástiques betuminosos pretendeu-se, através da quantificação de várias propriedades, avaliar o comportamento dos diferentes materiais, para diferentes temperaturas:

- elevadas; observadas durante o processo de fabrico e aplicação das misturas betuminosas. Para este estudo foi avaliada a viscosidade dinâmica dos mástiques através do viscosímetro rotativo;
- médias e elevadas em serviço; idênticas às que se verificam na mistura betuminosa colocada em camada. Neste estudo foram avaliadas as características reológicas das amostras, através de ensaios com reómetro de corte dinâmico.

Foi ainda avaliada a influência do filer no processo de envelhecimento do mástique betuminoso, através de ensaios de temperatura anel e bola para diferentes mástiques e para distintas situações de envelhecimento dos mástiques: sem envelhecimento e após envelhecimento a curto e a longo prazo.

Por fim, procurou-se avaliar a componente da adesão química entre o mástique betuminoso e o agregado, através de ensaios “pull-off”.

Estes estudos foram realizados para diferentes mástiques, fazendo variar o tipo de betume, tipo de filer e o valor da concentração deste último no mástique betuminoso.

Os mástiques betuminosos foram obtidos em laboratório, por agitação manual, com vareta de vidro, com os componentes colocados numa cápsula cerâmica assente sobre uma manta de aquecimento e com prévia estabilização da temperatura do betume e do filer a 150 °C (figura 6.33). Após se obter a perfeita homogenização da mistura, a amostra foi colocada em estufa à temperatura de 150 °C durante 20 min, procedendo-se de seguida a novo período de agitação. O tempo total de preparação do mástique foi assim de cerca de 30 min.



Figura 6.33 Produção laboratorial dos mástiques betuminosos ensaiados (Miranda, 2014)

Considera-se, no entanto, necessário estabelecer, em documento normativo, uma metodologia para a preparação de mástiques em laboratório, dado que o procedimento adotado pode influenciar as propriedades do mástique betuminoso.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados e estabelecidos alguns comentários aos mesmos.

6.2.2.1. Viscosidade dinâmica com viscosímetro rotativo

Antes de se dar início aos ensaios com viscosímetro rotativo, os mástiques betuminosos foram colocados em estufa, até se atingir a estabilização da temperatura de 120 °C. Foi avaliada a viscosidade para diferentes patamares de temperatura, sendo o mais baixo de 120 °C e o mais elevado de 170 °C, seleccionando-se um incremento de 10 °C para os patamares intermédios.

Os mástiques betuminosos foram produzidos para duas relações volumétricas filer/mástique, 0,2 e 0,3, para os seguintes produtos:

- betumes: 35/50 e PMB 45/80-60;
- fileres: Chda, Chca, Cem, FC1, FRG5, FRG7 e FRC5.

Na tabela 6.30 são apresentados os valores das relações volumétricas e das relações em massa, dos diferentes mástiques produzidos, sendo:

$\left(\frac{f}{m}\right)_v$ – Relação volumétrica filer/mástique;

$\left(\frac{f}{b}\right)_v$ – Relação volumétrica filer/betume;

$\left(\frac{f}{m}\right)_m$ – Relação ponderal ou relação gravimétrica filer/mástique;

$\left(\frac{f}{b}\right)_m$ – Relação ponderal ou relação gravimétrica filer/betume.

Tabela 6.30 Valores das diferentes concentrações de filer utilizadas na produção dos mástiques

Relações utilizadas	Referências dos mástiques betuminosos													
	35/50+Chda		35/50+Chca		35/50+Cem		35/50+FC1		35/50+FRG5		35/50+FRG7		35/50+FRC5	
	PMB+Chda		PMB+Chca		PMB+Cem		PMB+FC1		PMB+FRG5		PMB+FRG7		PMB+FRC5	
$\left(\frac{f}{m}\right)_v$	0,200	0,300	0,200	0,300	0,200	0,300	0,200	0,300	0,200	0,300	0,200	0,300	0,200	0,300
$\left(\frac{f}{b}\right)_v$	0,250	0,429	0,250	0,429	0,250	0,429	0,250	0,429	0,250	0,429	0,250	0,429	0,250	0,429
$\left(\frac{f}{m}\right)_m$	0,352	0,482	0,396	0,529	0,426	0,560	0,400	0,533	0,387	0,520	0,389	0,522	0,397	0,530
$\left(\frac{f}{b}\right)_m$	0,544	0,932	0,655	1,123	0,742	1,273	0,665	1,140	0,631	1,082	0,636	1,090	0,658	1,128

Na seleção dos fileres a utilizar no fabrico dos mástiques betuminosos atendeu-se aos seguintes aspetos:

- manter todos os fileres artificiais, dado que os valores obtidos nos ensaios de caracterização dos fileres evidenciam comportamentos distintos para todos eles;
- quanto aos fileres comerciais calcários, o FC6 não cumpre com os requisitos normativos e o FC2 apresenta granulometria significativamente mais fina que os restantes fileres. Para as restantes três amostras a seleção recaiu sobre o filer FC1;
- foram seleccionados dois fileres recuperados de granito, FRG5 e FRG7, por ambos cumprirem com os requisitos normativos, e porque apresentam valores muito distintos, para as propriedades avaliadas na caracterização dos fileres;
- optou-se ainda por seleccionar o filer recuperado de calcário FRC5, por se considerar o produto mais representativo dos restantes fileres ensaiados, não considerando, obviamente, os fileres que não cumprem com os requisitos da norma de produto.

Os mástiques betuminosos foram produzidos para duas concentrações distintas, seleccionadas tendo em conta os valores da concentração crítica, procurando não diferir de forma significativa dos valores normalmente usados no fabrico das misturas betuminosas.

Em 2004, Airey & Westwood, verificaram que os mástiques betuminosos possuem valores de viscosidade, quantificados no viscosímetro Brookfield, tanto maiores quanto maior a taxa de incorporação do filer. No entanto, também observaram nos ensaios realizados, que a viscosidade não apresentava proporcionalidade entre a tensão de

corte e a taxa de corte, verificando uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte, concluindo assim, que os mástiques betuminosos têm um comportamento não-Newtoniano, do tipo fluidificante. Os mesmos autores estudaram a variação da viscosidade dos mástiques em função do tempo de ensaio, observando uma diminuição da viscosidade com o tempo, de uma forma acelerada até cerca dos 10 min. Depois deste período, e até 60 min, a tendência é ainda de um ligeiro decréscimo. Atribuíram o fenómeno a uma combinação de três fatores: sedimentação das partículas sólidas do filer, existência de uma zona localizada em que a temperatura é mais elevada e à necessidade de inicialmente realizar um aumento da força de corte para movimentar as partículas do filer na suspensão até se conseguir uma taxa de corte uniforme.

Atendendo a estes comentários e ao facto de a norma de ensaio dizer respeito apenas ao material betume, foram realizadas algumas experimentações antes da realização dos ensaios.

Verificou-se, assim, a necessidade de prolongar o tempo de estabilização da temperatura dos provetes, um pouco para além do tempo mínimo exigido na norma de ensaio. No entanto, de modo a não prolongar demasiado esse tempo de estabilização, aspeto que poderia potenciar a sedimentação do filer, provocando a separação dos dois constituintes, optou-se por previamente estudar uma metodologia para os tempos de estabilização da temperatura. Este estudo permitiu concluir que no final de 15 min, prolongar o tempo de estabilização da temperatura em mais 1 min, resultava numa diminuição da viscosidade inferior a 0,1%.

Assim, como metodologia de ensaio, optou-se por realizar dois registos do valor da viscosidade, um ao fim de 15 min de estabilização, e um outro, 1 min após o primeiro registo, sendo avaliada a diferença entre as duas leituras. Caso esta diferença fosse inferior a 0,1%, o valor da viscosidade a considerar seria o correspondente à segunda leitura efetuada. Caso aquele valor fosse superior a 0,1%, o tempo de estabilização era prolongado em mais 1 min e realizada nova leitura. Para nenhuma das amostras ensaiadas se verificou a necessidade de realizar uma terceira leitura.

Nas tabelas 6.31 e 6.32 são apresentados os resultados obtidos para a viscosidade dinâmica dos betumes e dos mástiques betuminosos ensaiados.

Tabela 6.31 Valores da viscosidade do betume 35/50 e mástiques produzidos com este betume

T (°C)	Viscosidade dinâmica obtida em viscosímetro rotativo (mPa.s)								
	35/50	Chda 0,2	Chda 0,3	Chca 0,2	Chca 0,3	Cem 0,2	Cem 0,3	FC1 0,2	FC1 0,3
120	1175	5780	(*)	3567	14700	3442	8400	3300	6550
130	650	2810	(*)	1783	7883	1630	3750	1500	3125
140	393	1592	(*)	1033	4260	935	2146	830	1883
150	244	1018	(*)	647	2325	583	1316	520	1057
160	162	664	4700	437	1440	384	838	340	674
170	109	452	3485	320	998	265	562	250	482
T (°C)		FRG5 0,2	FRG5 0,3	FRG7 0,2	FRG7 0,3	FRC5 0,2	FRC5 0,3		
120		3900	13575	3492	10700	2890	4760		
130		2075	7100	1804	5525	1675	2570		
140		1160	3950	997	2990	905	1513		
150		700	2421	605	1750	548	920		
160		442	1538	415	1173	349	592		
170		297	1070	282	818	229	394		

(*) Não foi possível quantificar a viscosidade deste mástique para estas temperaturas

Tabela 6.32 Valores da viscosidade do betume PMB 45/80-60 e mástiques produzidos com este betume

T (°C)	Viscosidade dinâmica obtida em viscosímetro rotativo (mPa.s)								
	PMB 45/80-60	Chda 0,2	Chda 0,3	Chca 0,2	Chca 0,3	Cem 0,2	Cem 0,3	FC1 0,2	FC1 0,3
120	3642	21375	(**)	11825	33500	9688	26650	8896	17417
130	1871	10700	(**)	5755	15400	4725	10562	4308	8333
140	1090	5800	(**)	3142	8438	2605	5600	2375	4417
150	640	3408	(**)	1865	4900	1562	3317	1433	2665
160	415	2105	(**)	1188	3155	992	2100	920	1704
170	287	1332	(**)	795	2070	675	1404	625	1130
T (°C)		FRG5 0,2	FRG5 0,3	FRG7 0,2	FRG7 0,3	FRC5 0,2	FRC5 0,3		
120		10875	40667	10125	33500	10208	22900		
130		5275	17402	5050	14350	4858	10479		
140		2935	8875	2720	7275	2610	5588		
150		1792	5475	1650	4375	1575	3308		
160		1140	3575	1053	2750	1002	2050		
170		767	2255	710	1862	677	1355		

(**) Não foi possível produzir este mástique

Na figura 6.34 são apresentadas, para os dois betumes ensaiados, as leis de variação da viscosidade dinâmica com a temperatura, bem como a relação entre os valores obtidos para a viscosidade do betume modificado e do betume de pavimentação.

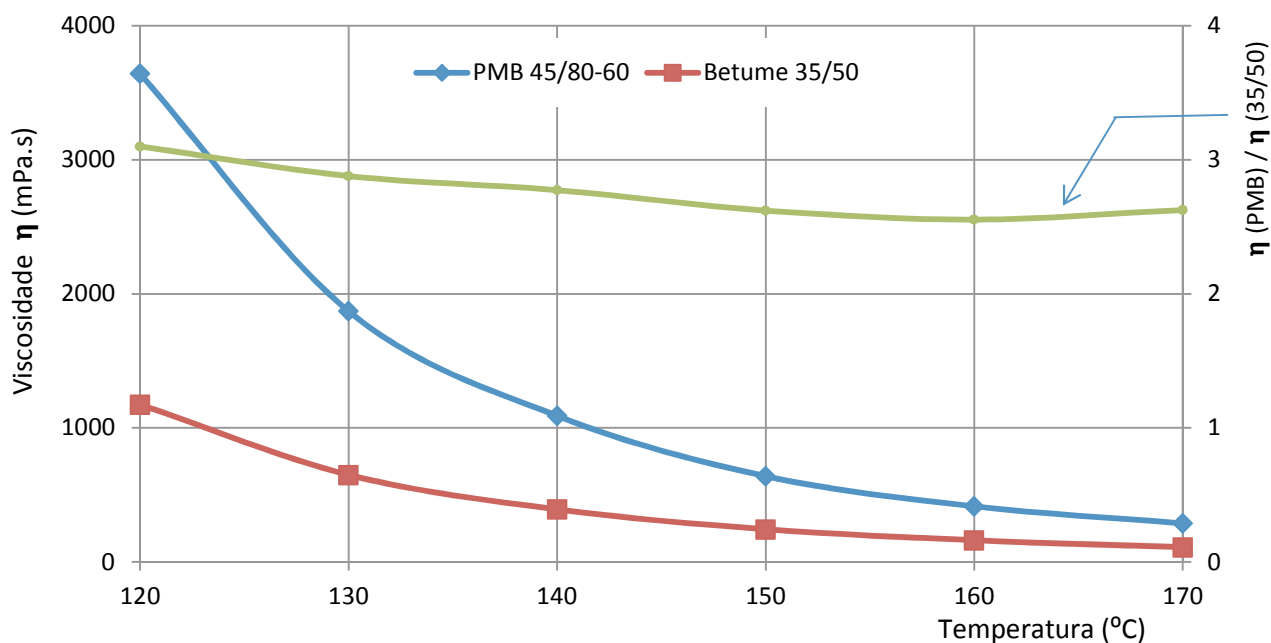


Figura 6.34 Viscosidade dinâmica dos betumes 35/50 e PMB 45/80-60 função da temperatura

A análise ao traçado das curvas apresentadas neste gráfico permite concluir o seguinte:

- para a gama de temperaturas estudada e para o mesmo valor de temperatura, o betume modificado apresenta maior viscosidade que o betume de pavimentação, qualquer que seja o valor da temperatura;
- para valores da temperatura entre 120 e 170 °C, os betumes apresentam valores de viscosidade idênticos, quando a temperatura do betume modificado é 20 °C superior à do betume 35/50;
- para valores da temperatura superiores a 150 °C, a relação entre a viscosidade dos dois betumes é praticamente constante e igual a 2,5. Já para temperaturas inferiores, verifica-se um crescimento gradual dessa relação com a diminuição da temperatura, ultrapassando o valor três para o patamar de temperatura de 120 °C;
- este aspeto assume particular importância, caso esta tendência se mantenha com a diminuição da temperatura, pois uma maior viscosidade do betume modificado a mais baixas temperaturas poderá corresponder a um acréscimo da rigidez do betume modificado, relativamente ao betume de pavimentação. Esta propriedade

contribui para uma menor suscetibilidade às deformações permanentes no caso do betumes modificado, relativamente ao betume de penetração 35/50.

Nas figuras 6.35 e 6.36 apresentam-se as leis de variação da viscosidade dinâmica com a temperatura para o betume 35/50 e mástiques com ele produzidos, respetivamente para taxas volumétricas de incorporação filer/mástique de 0,2 e 0,3.

As diferenças observadas para a viscosidade dos dois mástiques são muito elevadas, pelo que não foi possível realizar a representação gráfica da viscosidade, para uma única escala.

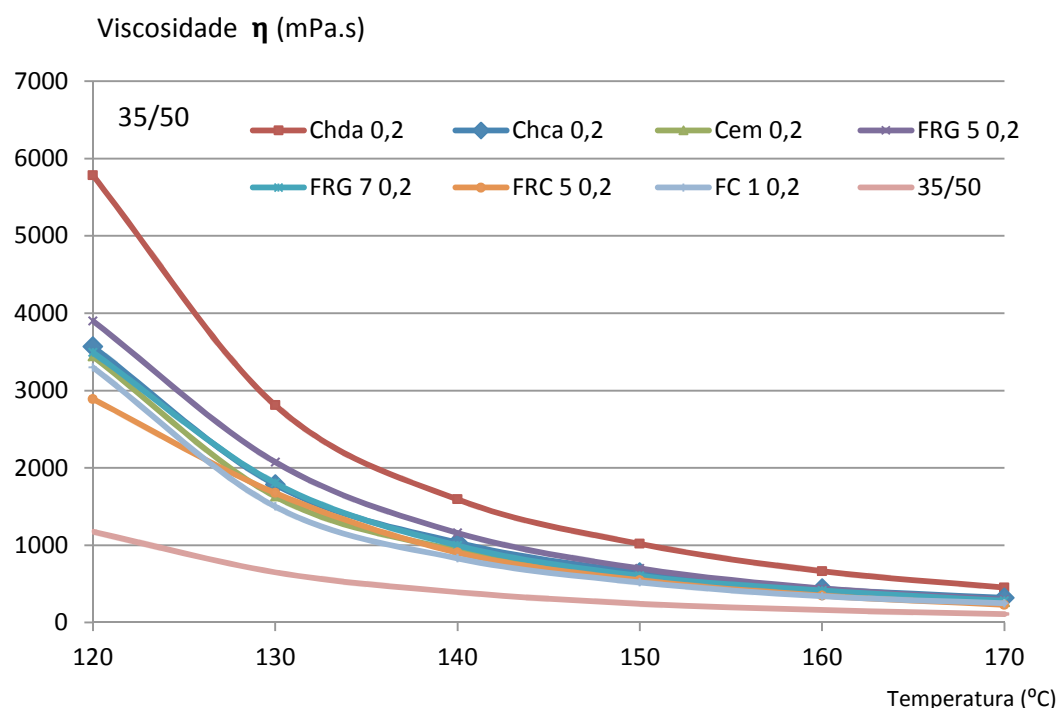


Figura 6.35 Viscosidade dinâmica do betume 35/50 e mástiques para $(f/m)_v = 0,2$

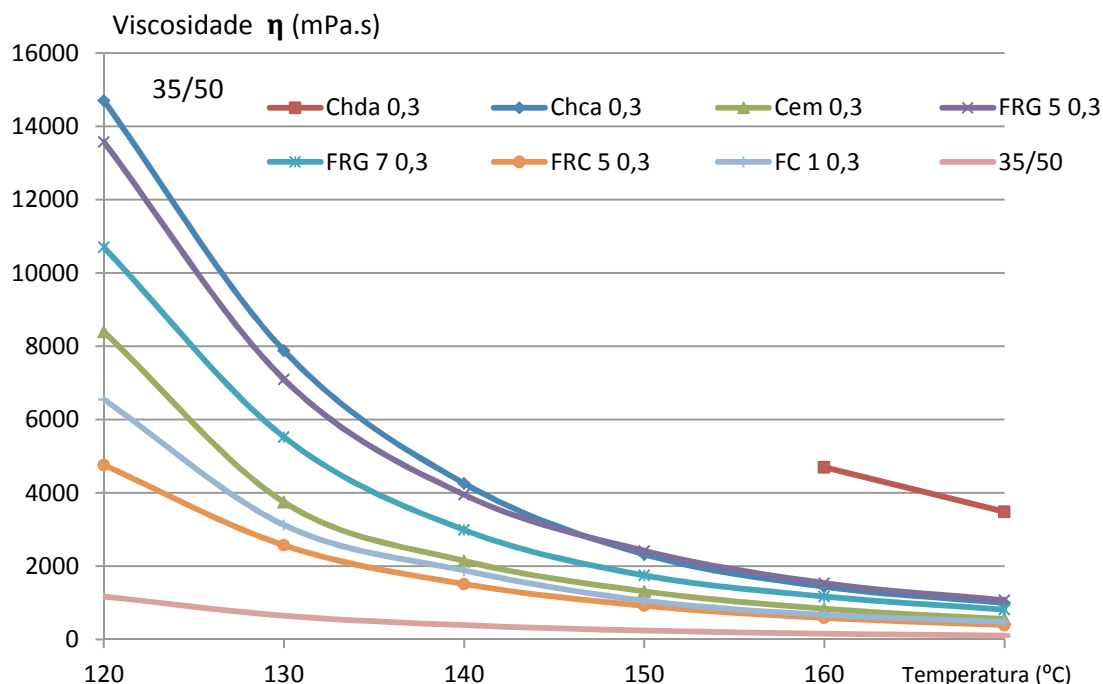


Figura 6.36 Viscosidade dinâmica do betume 35/50 e mástiques para $(f/m)_v = 0,3$

Os gráficos das figuras anteriores permitem evidenciar que:

- para a concentração 0,2, as variações da viscosidade dos diferentes mástiques, à exceção do mástique produzido com cal hidratada, não são muito significativas, para temperaturas superiores a 150 °C. No entanto, com a diminuição da temperatura, verifica-se um acréscimo na diferença de viscosidade entre os diferentes mástiques. Para a concentração de 0,3, as diferenças dos valores da viscosidade observadas para os diferentes mástiques são muito superiores;
- o incremento da viscosidade é muito significativo para os mástiques produzidos com uma concentração de filer de 0,3, relativamente à concentração 0,2;
- os fileres que mais contribuem para o aumento da viscosidade dos mástiques são a cal hidratada, a cal hidráulica e os fileres recuperados de granito, enquanto que o filer de calcário, o filer recuperado de calcário e o cimento são os que menos aumento da viscosidade do mástique apresentam. Como será referido de seguida, esta conclusão é igualmente verificada para o betume PMB 45-80/60.

As figuras 6.37 e 6.38 representam a variação, com a temperatura, da viscosidade relativa dos diferentes mástiques betuminosos produzidos com o betume 35/50, respetivamente para as concentrações de 0,2 e 0,3.

A grande variação dos valores da viscosidade relativa para os dois ligantes ensaiados, não permitiu a utilização da mesma escala nos dois gráficos.

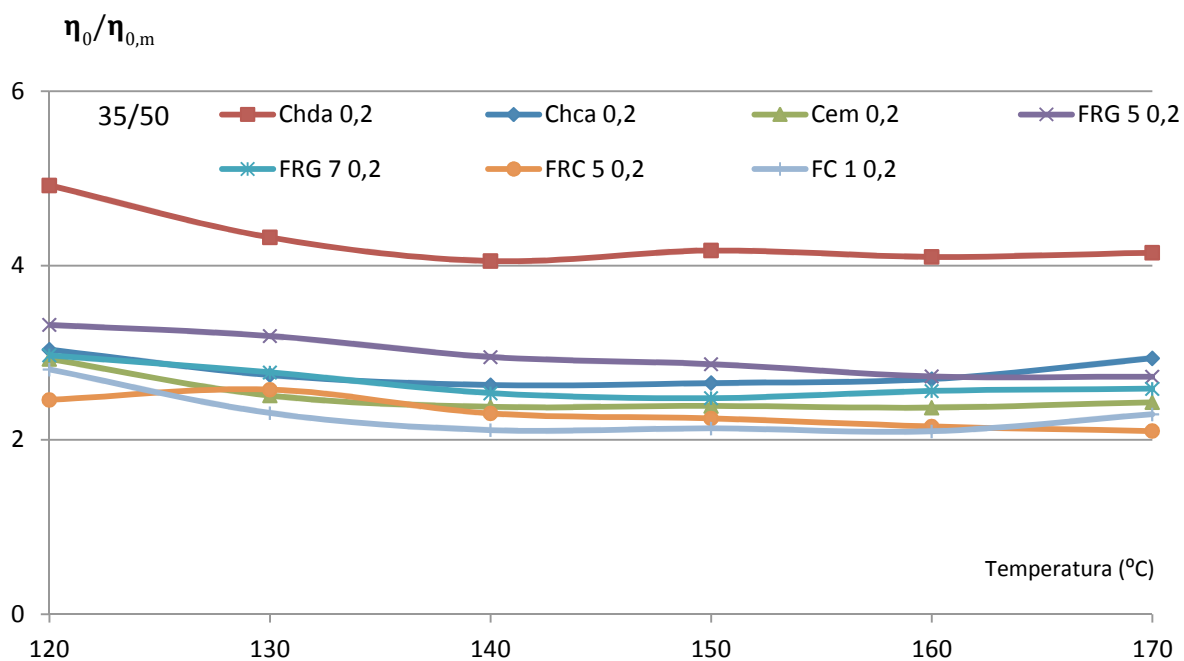


Figura 6.37 Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com betume 35/50 para $(f/m)_v = 0,2$

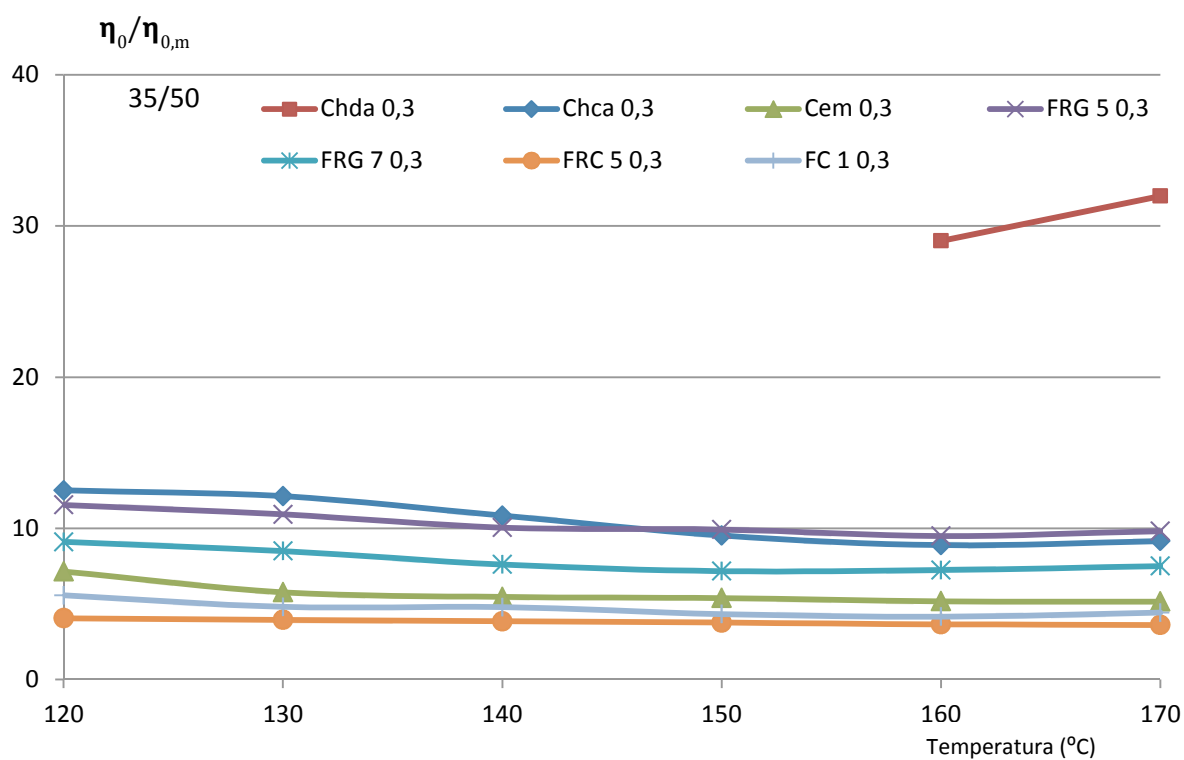


Figura 6.38 Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com betume 35/50 $(f/m)_v = 0,3$

Os gráficos apresentados evidenciam:

- a viscosidade relativa varia com o tipo de filer utilizado, sendo máxima para a cal hidratada. Para os restantes mástiques verifica-se que, os que apresentam maior viscosidade relativa, são os produzidos com fileres recuperados de granito e com cal hidráulica e, os que menores viscosidades relativas apresentam, são os mástiques com filer comercial calcário, filer recuperado de calcário e cimento Portland;
- a viscosidade do mástique produzido com cal hidratada para uma concentração de 0,3 é muito elevada, não tendo sido possível, com o equipamento utilizado nos ensaios, a sua quantificação para temperaturas inferiores a 160 °C;
- não considerando o mástique produzido com a cal hidratada, a viscosidade relativa dos mástiques apresenta um valor entre 2 e 3,4 para concentrações de 0,2, sendo esse valor de 5 a 13 para concentração de 0,3. Observa-se assim um agravamento da viscosidade relativa em cerca de 4 vezes, quando a concentração do filer no mástique verificou um acréscimo apenas de 50%;
- para todos os mástiques ensaiados, e para valores de temperatura superiores a 140 °C, verifica-se que a viscosidade relativa praticamente não varia com a temperatura do mástique betuminoso. Para valores de temperatura inferiores a 140 °C observa-se um aumento gradual da viscosidade relativa, com a diminuição da temperatura, para a generalidade dos mástiques ensaiados. No entanto, o valor da viscosidade relativa mantém-se constante, qualquer que seja a temperatura, para os mástiques produzidos com o filer comercial e com o filer recuperado de calcário para a concentração de 0,3;
- para um valor de concentração de filer no mástique de 0,2 e para temperaturas superiores a 140 °C, a viscosidade relativa apresenta um comportamento linear, correspondente à assintota de Einstein, observando-se assim válida a expressão [5.5], em que as duas grandezas variam proporcionalmente, sem depender, pelo menos significativamente, da temperatura a que a viscosidade é determinada.

As figuras 6.39 e 6.40 representam graficamente as leis de variação da viscosidade dinâmica com a temperatura para o betume PMB 45/80-60 e para os mástiques produzidos com este ligante, respetivamente para taxas volumétricas de incorporação filer/mástique de 0,2 e 0,3.

Nas figuras 6.41 e 6.42 são apresentados gráficos relativos à variação da viscosidade relativa em função da temperatura para os diferentes mástiques produzidos com o betume PMB 45/80-60. Refira-se que também estes gráficos não apresentam a mesma escala para a apresentação da viscosidade relativa.

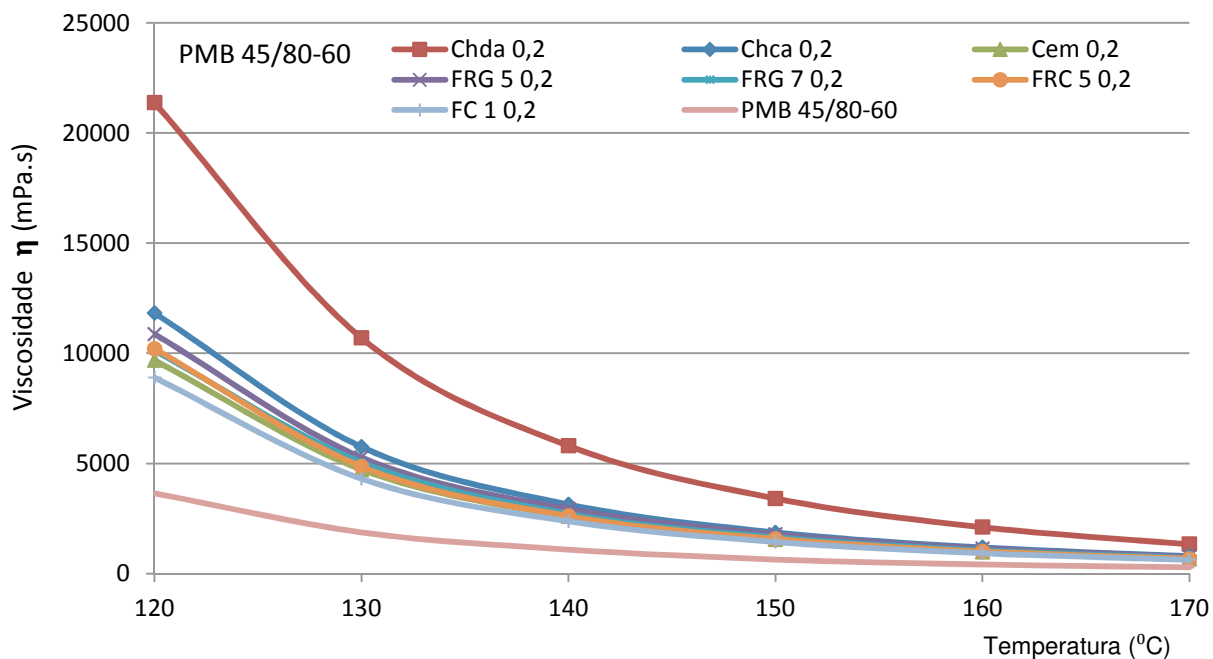


Figura 6.39 Viscosidade dinâmica do betume PMB 45/80-60 e mástiques respetivos $(f/m)_v = 0,2$

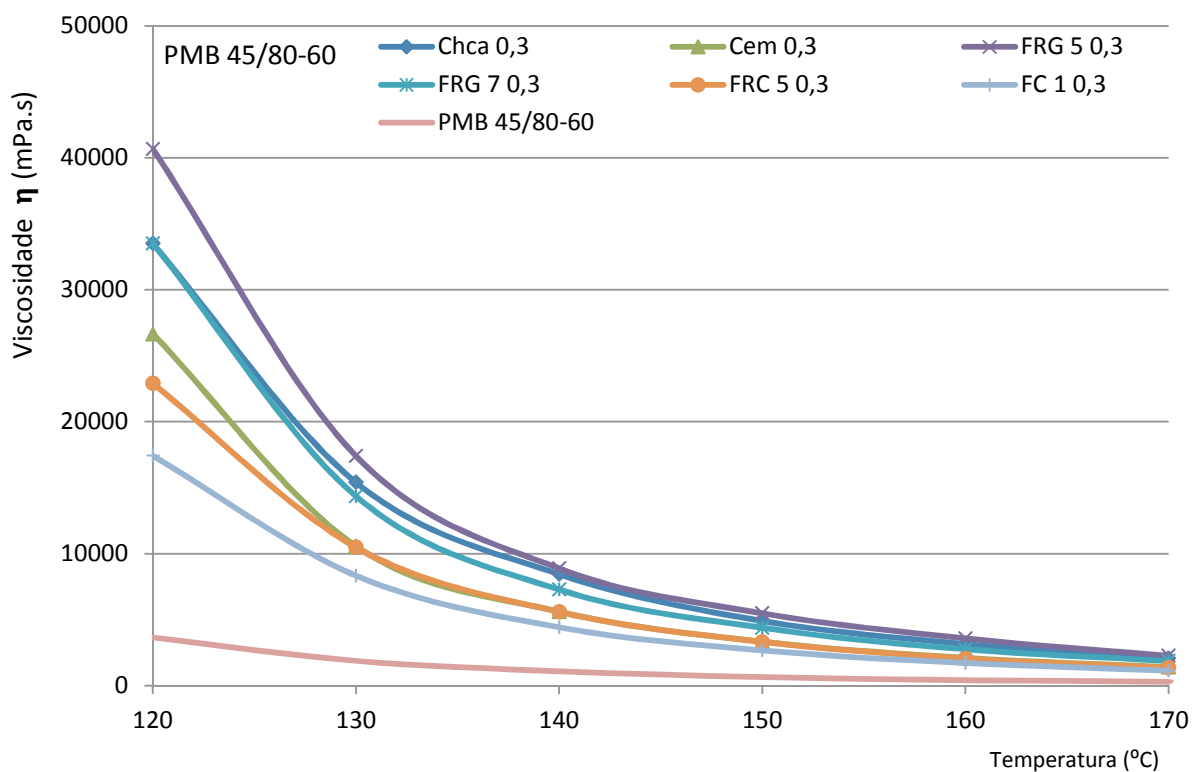


Figura 6.40 Viscosidade dinâmica do betume PMB 45/80-60 e mástiques respetivos $(f/m)_v = 0,3$

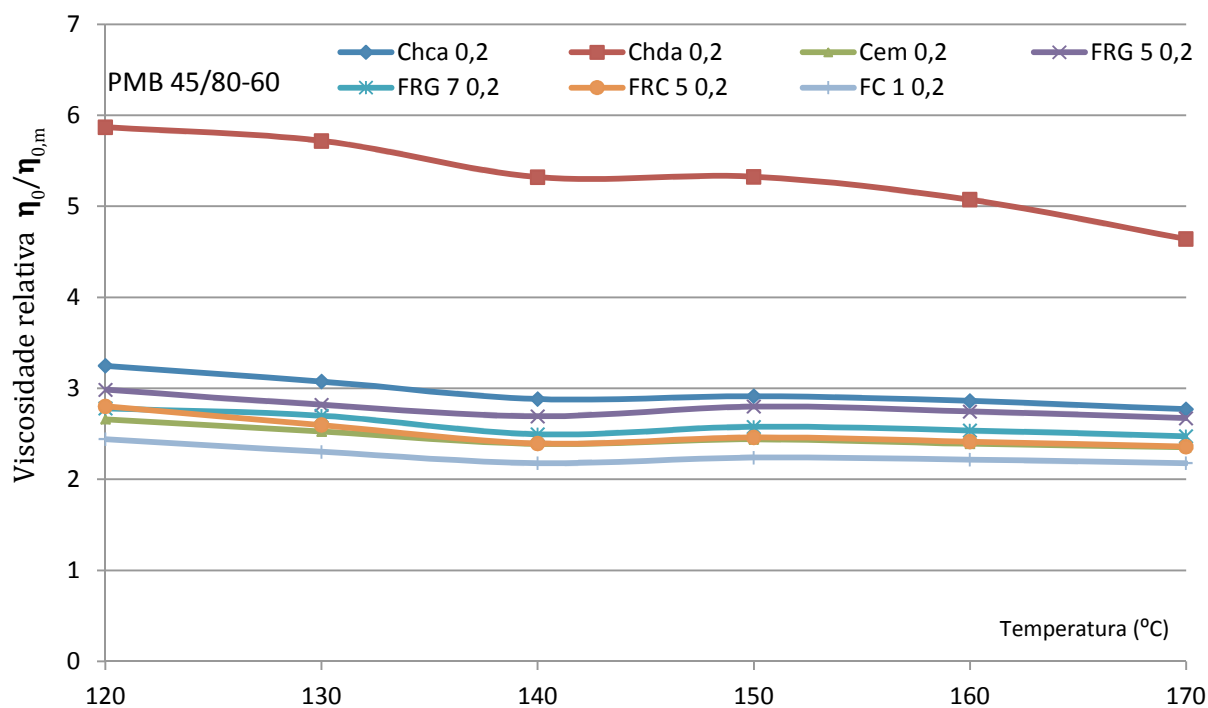


Figura 6.41 Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com PMB 45/80-60 $(f/m)_v = 0,2$

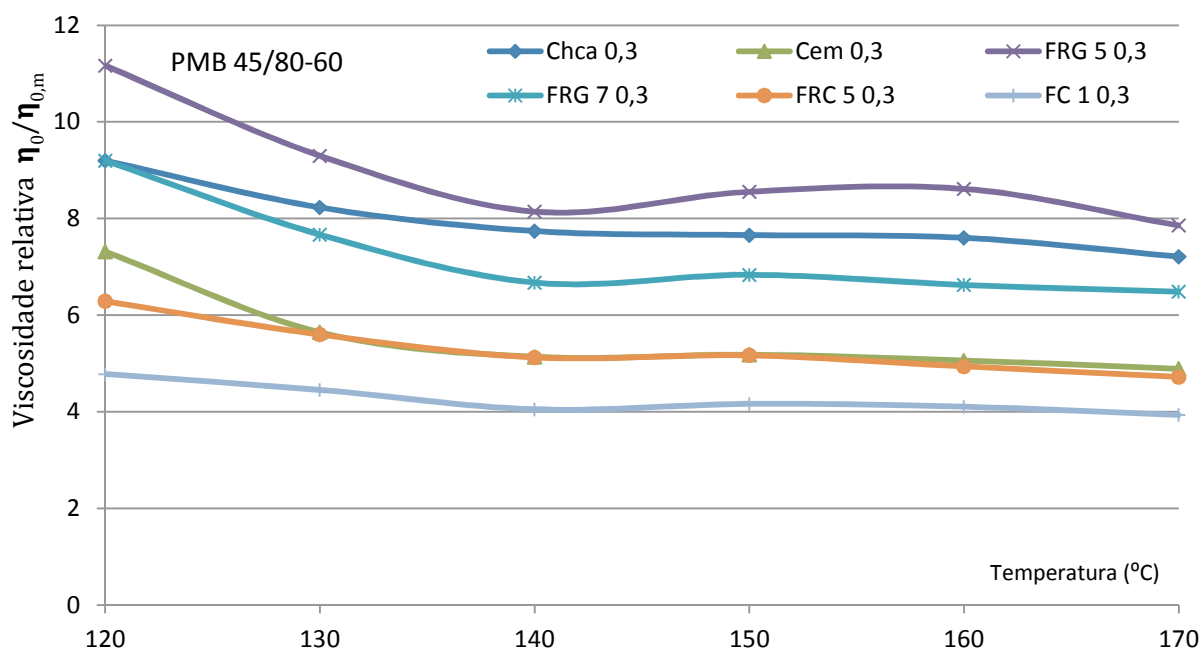


Figura 6.42 Viscosidade relativa dos mástiques produzidos com PMB 45/80-60 $(f/m)_v = 0,3$

Os gráficos permitem concluir que:

- a viscosidade dos mástiques betuminosos depende do tipo de betume e do tipo de filer utilizado, verificando-se, a exemplo do observado por Wang *et al.*, em 2011,

valores mais elevados para os mástiques com o betume modificado PMB 45/80-60 do que para os mástiques produzidos com o betume de pavimentação 35/50;

- à semelhança do que se concluiu com os mástiques produzidos com o betume 35/50, a viscosidade relativa de um mástique varia com o tipo de filer utilizado, sendo máxima para a cal hidratada. Também no caso da utilização do betume modificado, os fileres que menos contribuem para o aumento da viscosidade do mástique são: o comercial calcário, o recuperado de calcário e o cimento Portland;
- não foi possível realizar a determinação da viscosidade do mástique com cal hidratada para a concentração de 0,3;
- também para o caso dos mástiques produzidos com o betume modificado, a viscosidade relativa dos mástiques, produzidos para uma concentração de 0,2, apresenta valores entre 2 a 3,1 para a generalidade dos mástiques, e entre 4,5 e 6 para o mástique com cal hidratada. Já para a concentração de 0,3 a viscosidade relativa varia entre 4 e 11 para todos os fileres ensaiados. Estes valores são praticamente iguais aos obtidos para os mástiques produzidos com o betume 35/50.

Face a esta última constatação, poderemos concluir que a viscosidade relativa de um mástique betuminoso, para a gama de temperaturas entre 120 e 170 °C, não depende do tipo de betume, variando apenas com o tipo e concentração do filer no mástique betuminoso e com a temperatura. A variação da viscosidade relativa com a temperatura é mais importante para valores inferiores a 140 °C.

Nas figuras 6.43 a 6.56 são apresentados gráficos que definem a variação da viscosidade relativa com a taxa de incorporação do filer, para os diferentes patamares de temperatura estudados, bem como as curvas que representam a variação da viscosidade relativa com a concentração de filer, correspondente à aplicação da expressão 4.8, onde foram considerados para o fator \varnothing_m , os valores apresentados na tabela 6.33.

Refira-se que em todos os gráficos foi mantida constante a escala respeitante à viscosidade relativa, exceto para o mástique com o betume 35/50 e a cal hidratada.

Tabela 6.33 Valores do fator \varnothing_m adotados para os fileres

Referência do filer	Chda	Chca	Cem	FC1	FRC5	FRG5	FRG7
\varnothing_m	37	45	55	60	60	45	50

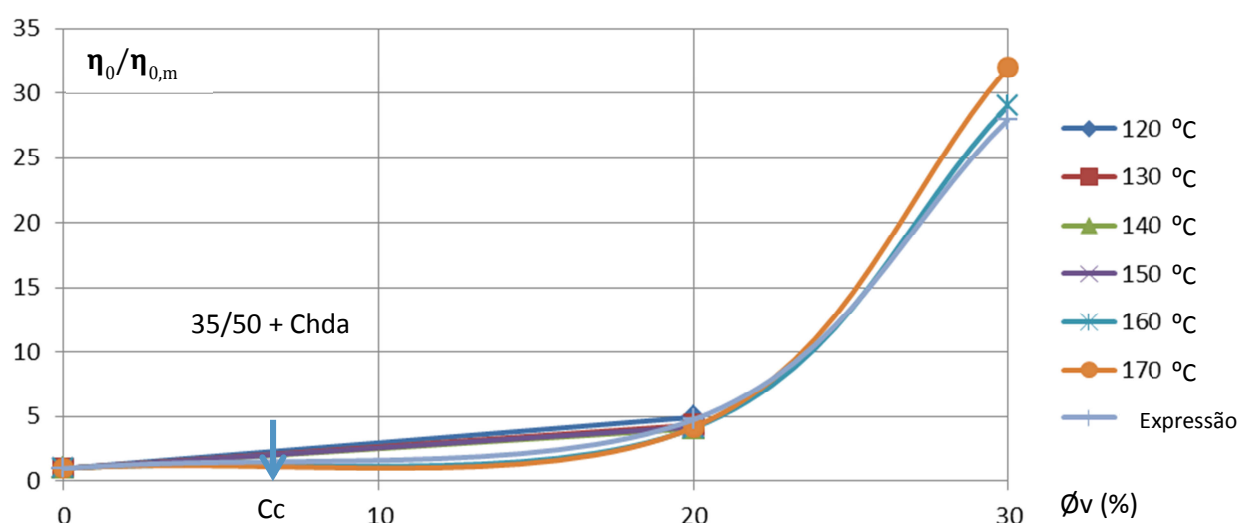


Figura 6.43 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com Chda função da concentração

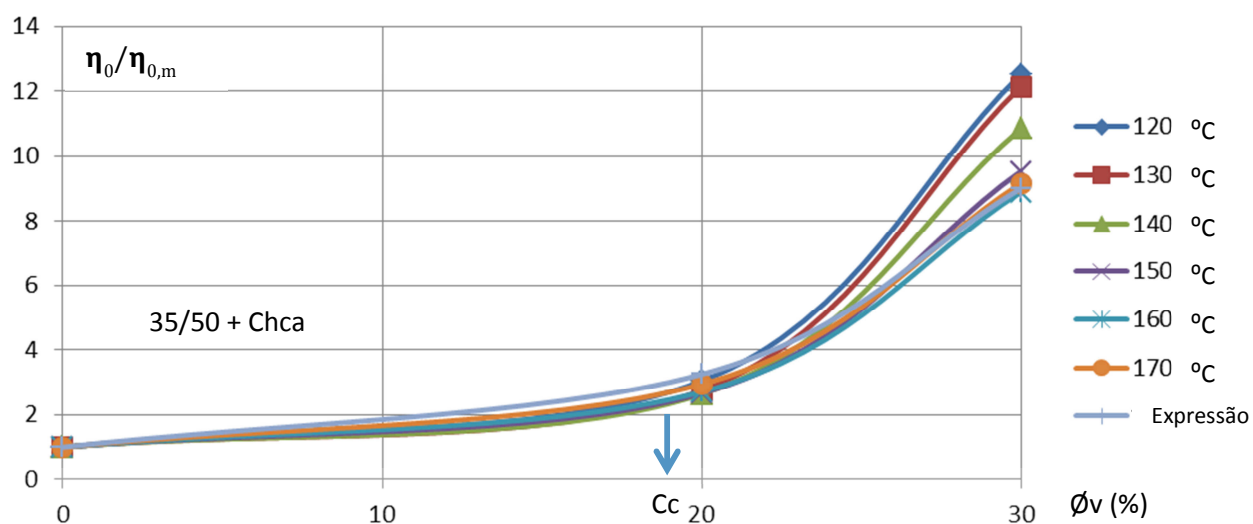


Figura 6.44 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com Chca função da concentração

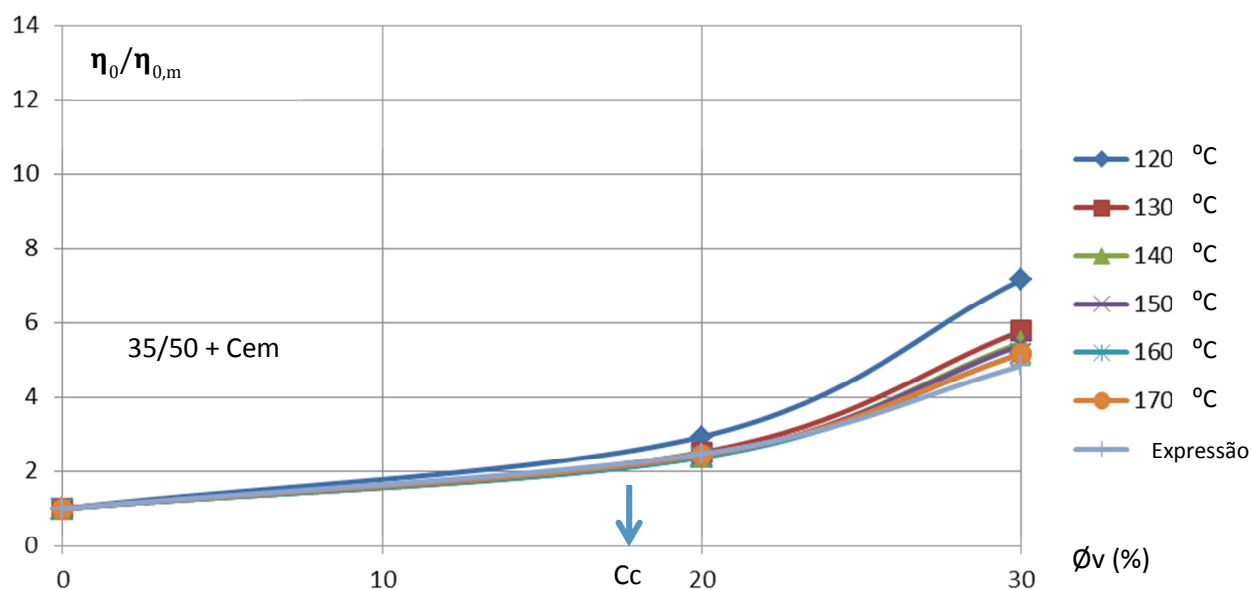


Figura 6.45 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com Cem função da concentração

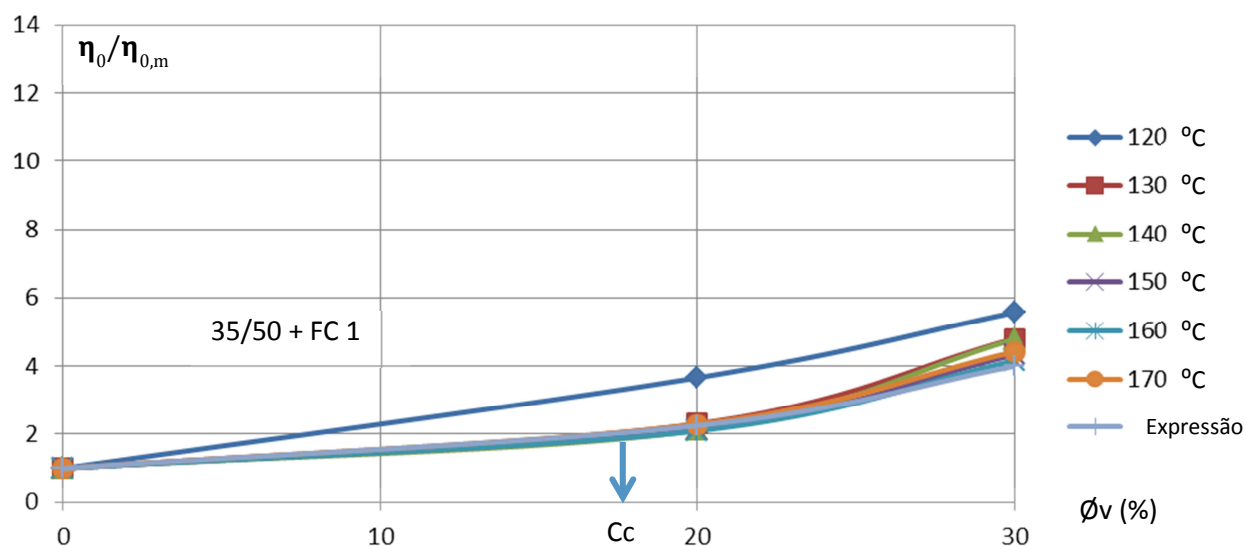


Figura 6.46 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FC1 função da concentração

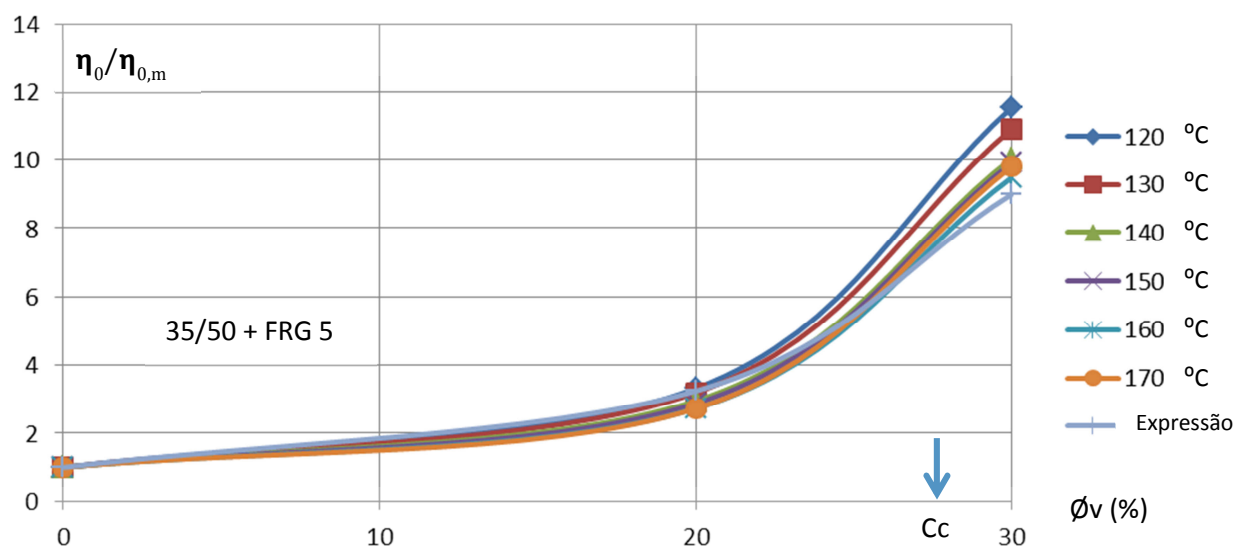


Figura 6.47 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FRG5 função da concentração

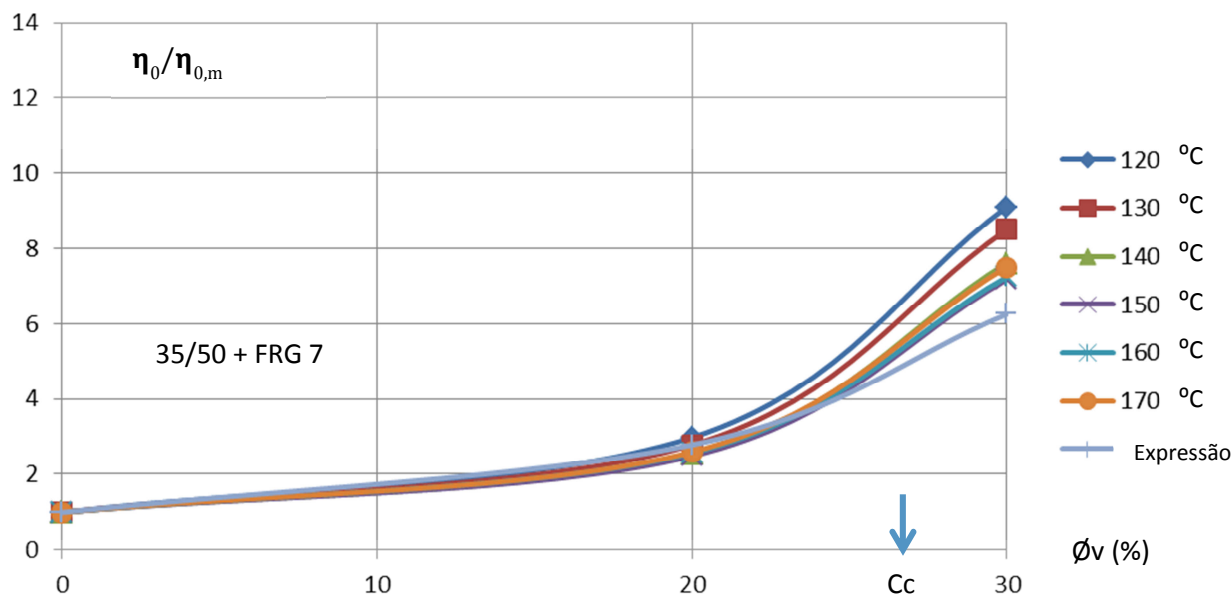


Figura 6.48 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FRG7 função da concentração

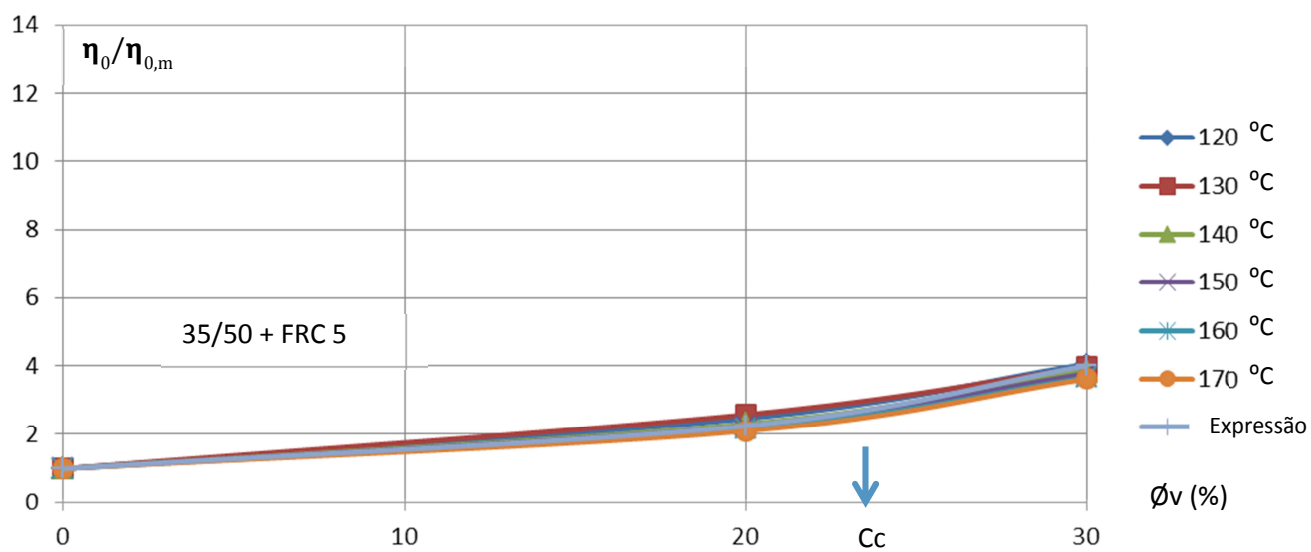


Figura 6.49 Viscosidade relativa do mástique 35/50 com FRC5 função da concentração

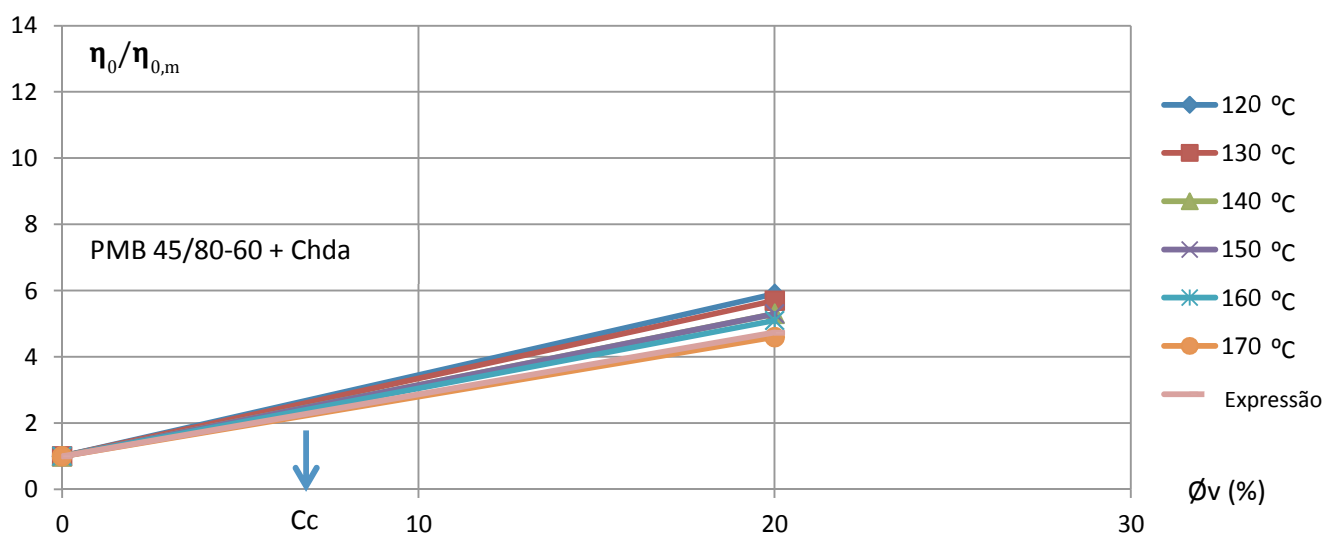


Figura 6.50 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com Chda função da concentração

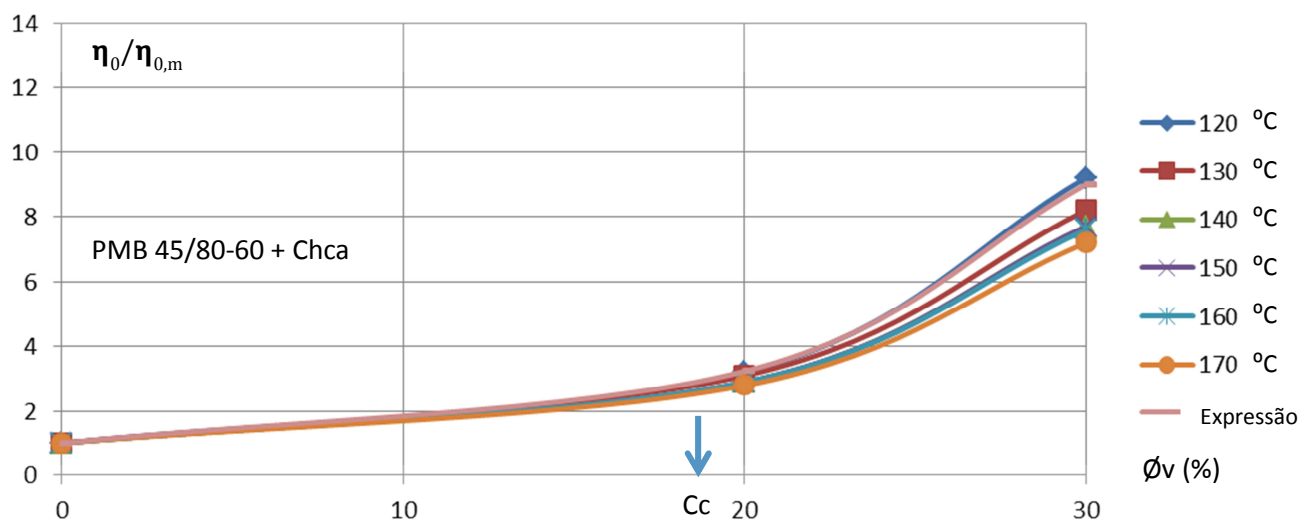


Figura 6.51 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com Chca função da concentração

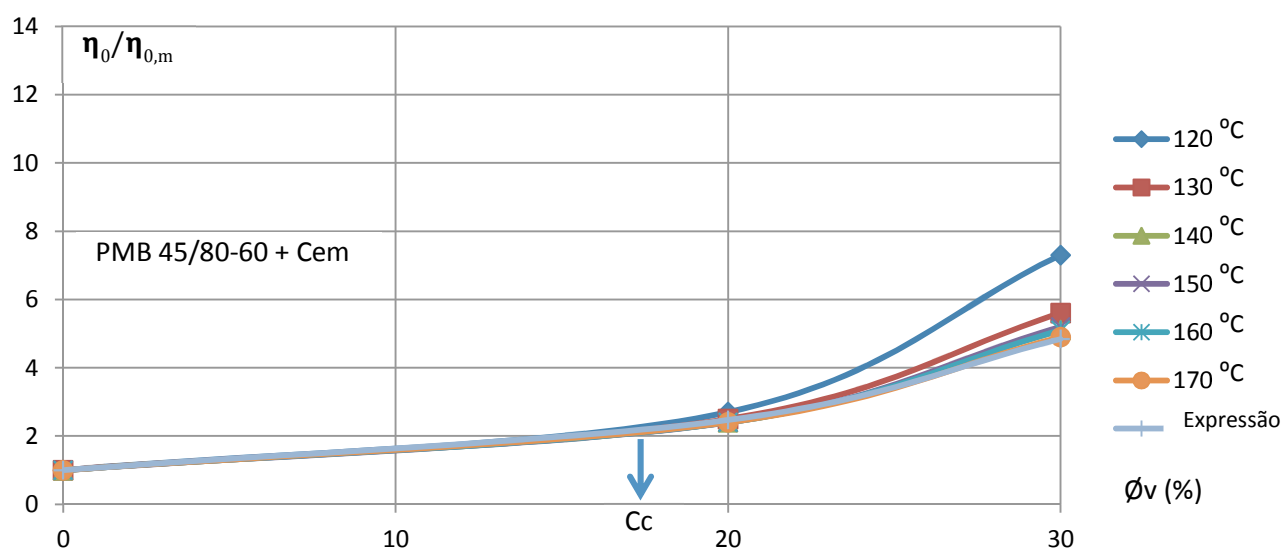


Figura 6.52 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com Cem função da concentração

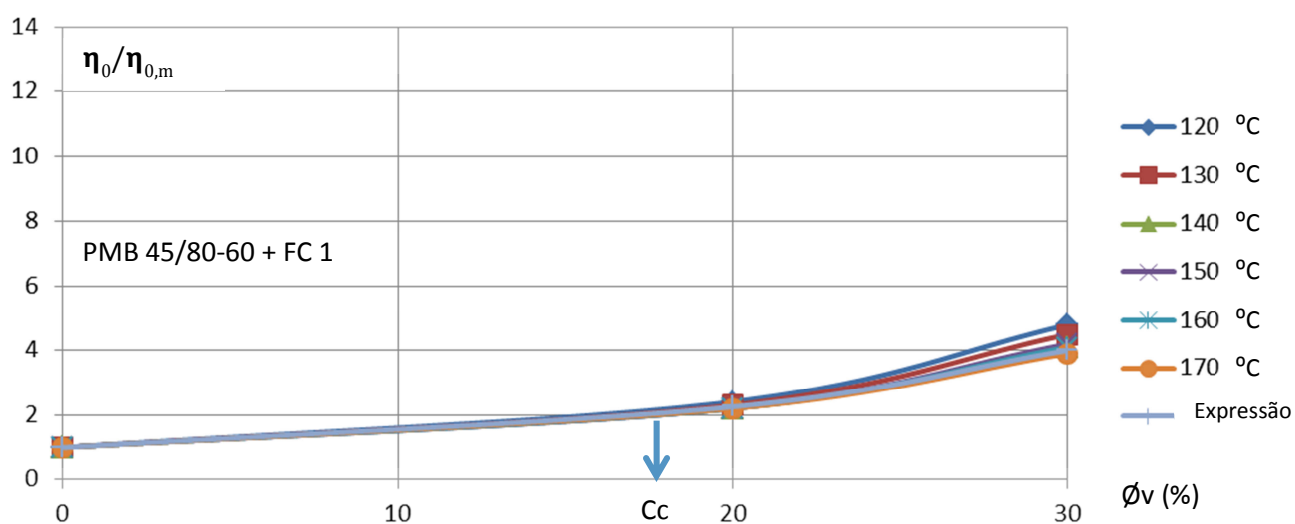


Figura 6.53 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FC1 função da concentração

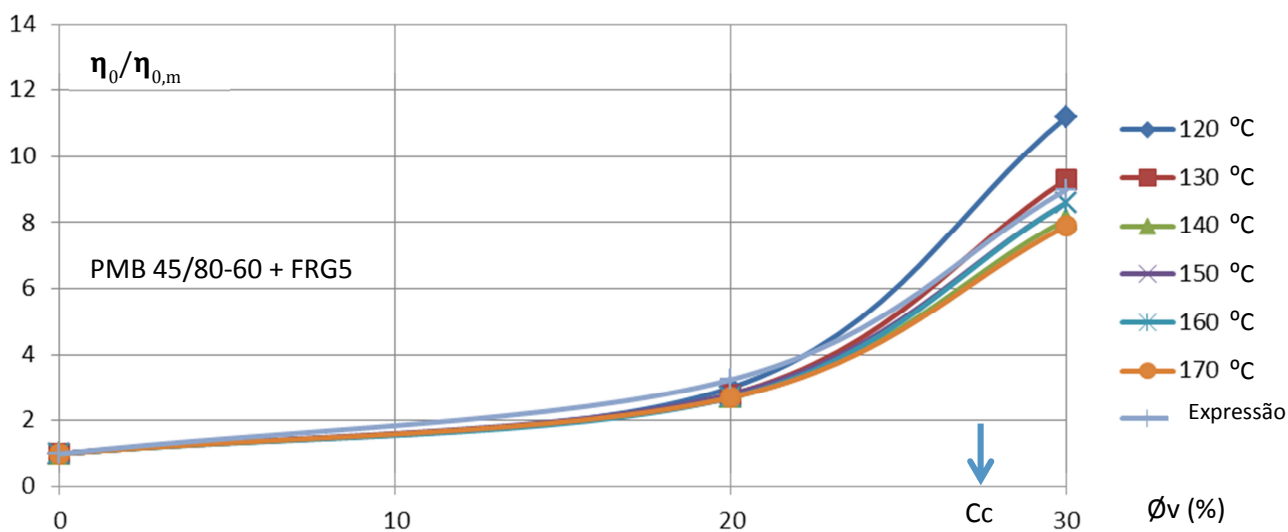


Figura 6.54 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FRG5 função da concentração

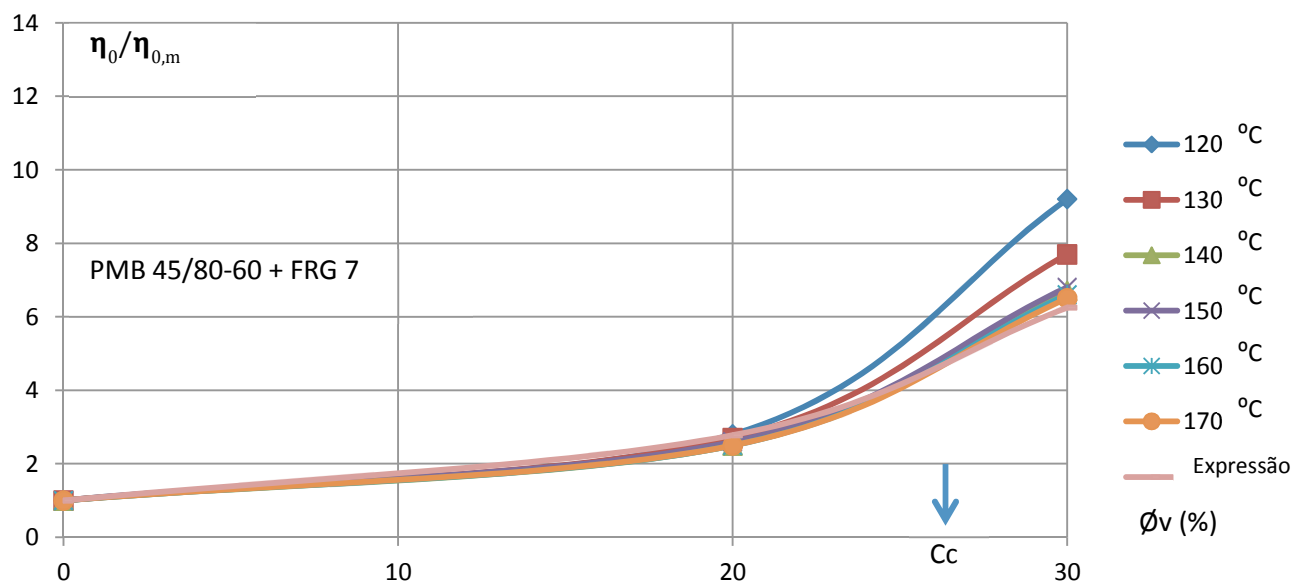


Figura 6.55 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FRG7 função da concentração

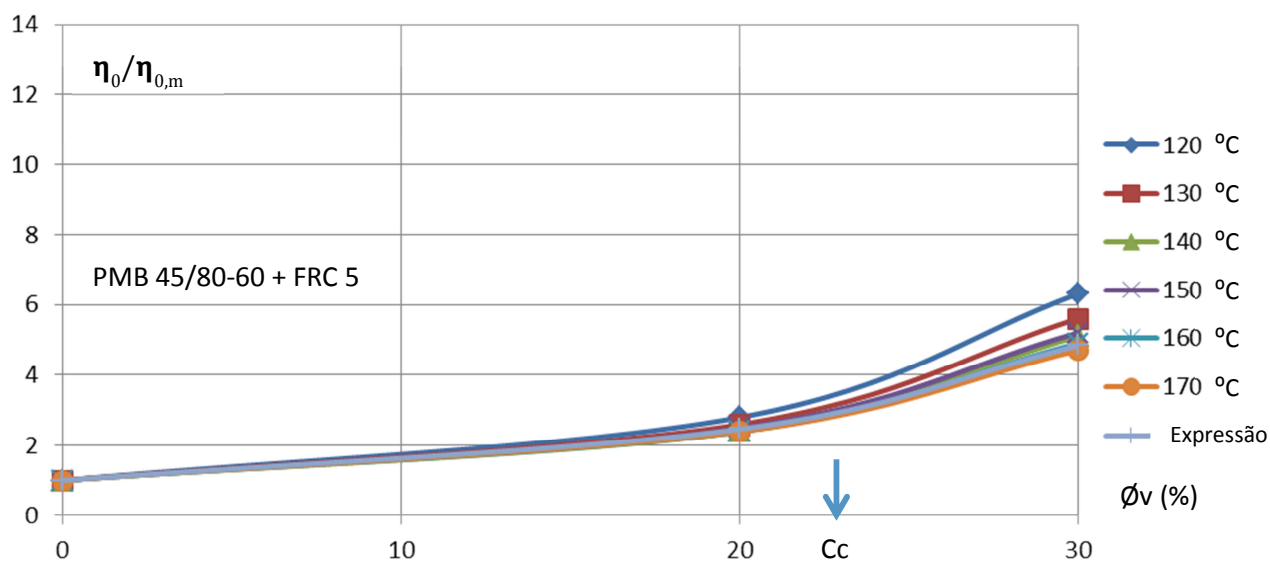


Figura 6.56 Viscosidade relativa do mástique PMB 45/80-60 com FRC5 função da concentração

Para os materiais ensaiados, e para a gama de temperaturas utilizada, podem ser estabelecidas, face a todo o trabalho laboratorial realizado e aos resultados obtidos nos ensaios de viscosidade com viscosímetro rotativo, as seguintes conclusões:

- o betume modificado PMB 45/80-60 apresenta, para valores de temperatura entre 150 e 170 °C, uma viscosidade cerca de 2,5 vezes superior à do betume 35/50, valor que tende a aumentar com a diminuição da temperatura;

- a viscosidade relativa dos mástiques betuminosos não apresenta grande variação com a alteração do tipo de betume, verificando-se apenas ligeiras diferenças no caso dos mástiques com a cal hidráulica e com o filer recuperado de calcário, concluindo-se assim que o comportamento do mástique betuminoso é regulado fundamentalmente pelo tipo de filer utilizado;
- para um mástique betuminoso produzido com um determinado filer, a viscosidade relativa mantém-se aproximadamente constante, para qualquer patamar de temperatura superior a 140 °C, podendo afirmar-se que a viscosidade relativa segue a expressão 4.8 sugerida por Marion-Pierce. Para valores de temperatura inferiores, e para a maior parte dos fileres, a viscosidade relativa do mástique betuminoso passa a depender igualmente da temperatura, pelo que esta expressão não deve ser usada para esta gama de temperaturas;
- os mástiques betuminosos apresentam viscosidade superior às dos betumes com que foram produzidos. Independentemente do tipo de betume utilizado, os fileres podem ser ordenados de forma decrescente, relativamente ao aumento de viscosidade que impõem ao mástique, da seguinte forma: cal hidratada, cal hidráulica, fileres recuperados de granito, cimento, filer comercial de calcário e filer recuperado de calcário. Se atendermos ao valor de $170 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ recomendado, no anexo nacional A da NP EN 12591 (IPQ, 2011), para a viscosidade cinemática do betume no momento do fabrico da mistura betuminosa, constatamos que este valor é observado para uma temperatura do betume 35/50 próxima de 160 °C. Por outro lado, essa mesma recomendação, a ser feita para o betume modificado, conduziria a valores da temperatura do betume superiores a 180 °C. Conclui-se assim que a temperatura no momento do fabrico da mistura betuminosa deve ser fixada, em termos da viscosidade, não para o betume mas sim para o mástique betuminoso;
- analisando esta hierarquização e os valores obtidos nos ensaios realizados ao filer, podemos concluir que o aumento de viscosidade do betume provocado pelo filer, apresenta boa correlação, não com os vazios de Rigden, mas com o valor da variação da temperatura anel e bola. Este aspeto está de acordo com a conclusão anterior estabelecida, de que a viscosidade relativa do mástique betuminoso, não depende significativamente do tipo de betume. Podemos então concluir que os vazios de Rigden dos fileres não deve ser usado na previsão do aumento da viscosidade do mástique betuminoso. Esta mesma conclusão foi expressa por Faheem *et al.*, em 2012;

- durante a produção dos vários mástiques em laboratório foi sentida a necessidade de ser estabelecido, em documento normativo, um procedimento que defina a forma de produzir as amostras. O procedimento deverá estabelecer a forma de realizar a adição dos dois materiais, definindo, nomeadamente, os meios mecânicos, tempo de agitação, temperatura do filer e viscosidade do betume no momento da adição. Todos estes aspetos interferem nas características finais do mástique e foram igualmente identificados por Hesami *et al.*, em 2014.

Os valores obtidos experimentalmente evidenciam, conforme já referido, que a viscosidade relativa do mástique é função, não só do tipo e concentração do filer, mas também da temperatura. Assim, pretendeu-se, com os dados experimentais obtidos neste trabalho, melhorar a expressão de Marion-Pierce, procurando obter um modelo matemático para descrever e estimar o valor da viscosidade relativa de um mástique, considerada como variável dependente, em função das seguintes variáveis consideradas independentes:

- ✓ dos vazios do filer seco compactado ou da variação da temperatura anel e bola;
- ✓ concentração do filer no mástique;
- ✓ temperatura.

Atendendo a que os dados deste estudo são provenientes de delineamentos complexos pretendeu-se ainda, tal como é habitual neste tipo de pesquisa, encontrar o modelo que melhor se ajustasse à determinação da viscosidade relativa, pela utilização de modelos de regressão não-lineares, procurando-se deste modo explorar e inferir a relação de uma variável resposta com variáveis preditoras específicas, sendo que as propostas encontradas revelaram-se algo limitadas.

Assim, e tendo em conta os avaliadores de qualidade de ajuste: coeficiente de determinação, quadrado médio do resíduo e desvio médio absoluto dos resíduos, verificou-se que os modelos obtidos, em que a resposta do sistema depende de determinadas variáveis explicativas relevantes, não obtiveram a convergência suficiente para assegurar a robustez dos mesmos. Este aspeto é, muito provavelmente, consequência do carácter discreto das variáveis contempladas no trabalho experimental realizado, não permitindo assim prever valores fiáveis longe da região experimental.

6.2.2.2. Envelhecimento

De modo a avaliar de que forma o filer contribui para o envelhecimento do mástique betuminoso, foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. Procurou-se com os ensaios realizados, simular o envelhecimento verificado pelos materiais a curto prazo, no processo de fabrico, transporte e colocação da mistura e a longo prazo, ou seja, durante a vida da mistura betuminosa colocada em camada no pavimento.

Os ensaios foram realizados no laboratório CIESM-INTEVIA (*Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos*) em Madrid e a metodologia consistiu em realizar ensaios de temperatura anel e bola, antes e após a exposição dos mástiques a ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório.

No desenvolvimento deste estudo considerou-se que a metodologia RTFOT não é adequada ao envelhecimento de mástiques betuminosos, pois existe o risco de, devido ao movimento de rotação dos frascos, se verificar a sedimentação do filer durante o ensaio, considerando-se mais representativa a utilização apenas da metodologia PAV.

Assim sendo, realizaram-se previamente, para os dois betumes utilizados neste trabalho, ensaios de envelhecimento RTFOT, mantendo inalterada toda a metodologia prevista na norma EN 12607-1 (CEN, 2014), e ensaios de envelhecimento PAV, segundo o descrito na norma EN 14769 (CEN, 2012), para uma pressão de 2,1 MPa e uma temperatura de 100 °C, mas adotando diferentes períodos de exposição. Procurou-se assim avaliar qual o tempo necessário considerar no ensaio PAV, para se obter o mesmo estado de envelhecimento do ensaio RTFOT.

Para as diferentes amostras envelhecidas foram realizados ensaios de temperatura anel e bola, cujos resultados permitiram concluir, que um período de 5h do ensaio PAV conduz a resultados da temperatura anel e bola semelhantes aos avaliados na mesma amostra de betume após o ensaio RTFOT.

Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados na tabela 6.34.

Face aos resultados obtidos, optou-se por realizar os ensaios de envelhecimento dos mástiques betuminosos, submetendo as amostras apenas ao ensaio PAV, uma primeira exposição de 5h de duração, para simular o envelhecimento a curto prazo, seguido de novo procedimento PAV, agora por um período de 20 h, correspondente ao envelhecimento a longo prazo.

Tabela 6.34 Temperatura anel e bola dos betumes para diferentes estados de envelhecimento

Tipo de amostra e condições de envelhecimento	Temperatura $T_{R\&B}$ (°C)	
	35/50	PMB 45/80-60
Betume sem envelhecimento	51,0	63,4
Betume após envelhecimento RTFOT	54,0	71,8
Betume após RTFOT e PAV durante 20 h	62,2	89,8
Betume após envelhecimento PAV durante 5 h	55,4	71,2
Betume após PAV 5 h seguido de PAV 20 h	62,8	91,4

Foram realizados ensaios de temperatura anel e bola para os betumes e mástiques betuminosos para três situações distintas:

- sem envelhecimento;
- após 5 h do ensaio PAV (simulação de envelhecimento a curto prazo);
- após 5 h seguidas de mais 20 h de ensaio PAV (simulação de envelhecimento a curto e longo prazo).

Os produtos ensaiados foram ao seguintes:

- betumes 35/50 e PMB 45/80-60;
- mástiques produzidos com os betumes 35/50 e PMB 45/80-60 com a adição dos fileres: Chda, Chca, Cem, FC1, FRC1, FRG1 e FRG5.

Todos os mástiques foram produzidos para uma relação volumétrica filer/mástique de 0,2.

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados nas tabelas 6.35 e 6.36 e figuras 6.57 e 6.58 encontrando-se assinalados, quer nas tabelas quer nas figuras, os valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios de temperatura anel e bola dos mástiques betuminosos, para as diferentes condições de envelhecimento. Nas referidas tabelas são ainda apresentados os incrementos da temperatura anel e bola, para as amostras envelhecidas, relativamente aos valores obtidos desta propriedade, para as mesmas amostras não envelhecidas.

Tabela 6.35 Temperatura anel e bola do betume 35/50 e respectivos mástiques

Referência da amostra	Condições de envelhecimento				
	A - Não envelhecido	B - Após 5h PAV	B - A	C - Após 5+20 h PAV	C - A
	T R&B (°C)	T R&B (°C)	Δ T R&B (°C)	T R&B (°C)	Δ T R&B (°C)
35/50	51,0	55,4	4,4	62,8	11,8
35/50 + 0,2 Chda	58,4	61,4	3,0	66,6	8,2
35/50 + 0,2 Chca	54,2	58,6	4,4	63,6	9,4
35/50 + 0,2 Cem	54,2	59,6	5,4	64,0	10,3
35/50 + 0,2 FC1	53,8	57,8	4,0	64,4	10,6
35/50 + 0,2 FRC1	54,0	58,4	4,4	65,0	11,0
35/50 + 0,2 FRG1	54,2	59,4	5,2	65,2	11,0
35/50 + 0,2 FRG5	54,4	59,4	5,0	65,2	10,8

Tabela 6.36 Temperatura anel e bola do betume PMB 45/80-60 e respectivos mástiques

Referência da amostra	Condições de envelhecimento				
	A - Não envelhecido	B - Após 5h PAV	B - A	C - Após 5+20 h PAV	C - A
	T R&B (°C)	T R&B (°C)	Δ T R&B (°C)	T R&B (°C)	Δ T R&B (°C)
PMB 45/80-60	63,4	71,2	7,8	91,4	28,0
PMB 45/80-60 + 0,2 Chda	73,8	78,6	4,8	92,6	19,0
PMB 45/80-60 + 0,2 Chca	69,4	77,8	8,4	95,2	25,8
PMB 45/80-60 + 0,2 Cem	68,6	76,4	7,8	95,2	26,6
PMB 45/80-60 + 0,2 FC1	67,8	77,2	9,4	96,4	28,6
PMB 45/80-60 + 0,2 FRC1	69,0	77,6	8,6	96,6	29,6
PMB 45/80-60 + 0,2 FRG1	69,2	78,2	9,0	99,0	29,8
PMB 45/80-60 + 0,2 FRG5	68,8	78,0	9,2	105,2	36,7

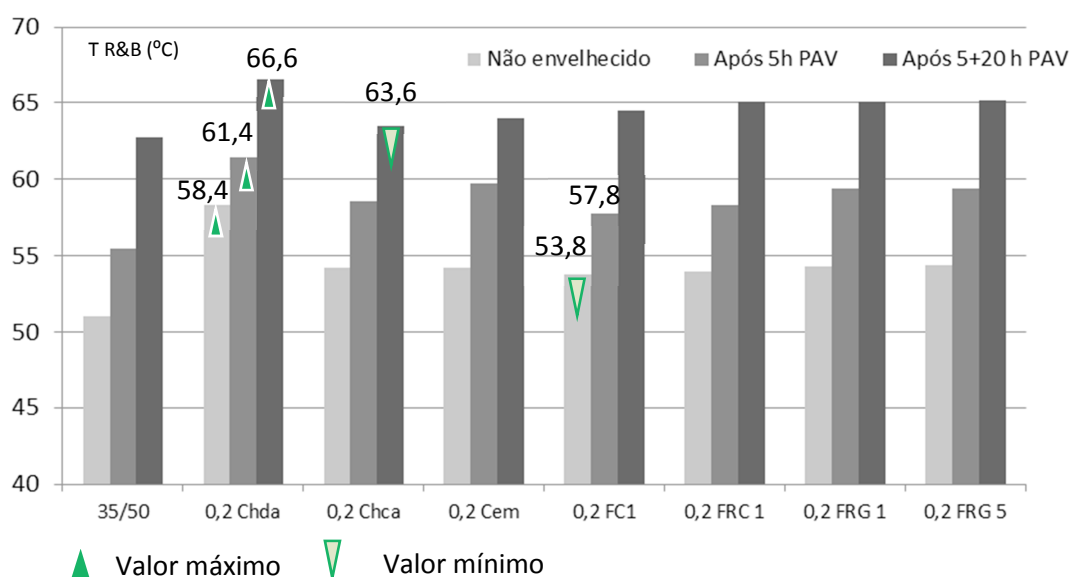


Figura 6.57 Temperatura anel e bola do betume 35/50 e mástiques respectivos

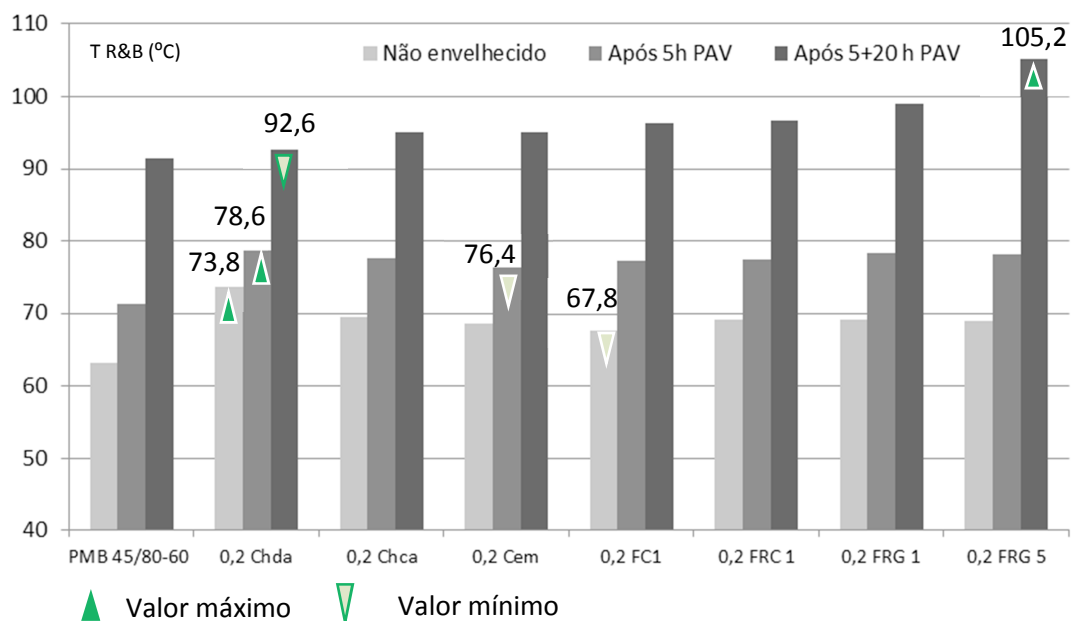


Figura 6.58 Temperatura anel e bola do betume PMB 45/80-60 e mástiques respetivos

Nas tabelas 6.37 e 6.38 são apresentados, para cada uma das condições de envelhecimento, os valores do cociente entre os valores obtidos da temperatura anel e bola dos mástiques e do betume utilizado.

Tabela 6.37 Relação entre as temperaturas anel e bola dos mástiques e do betume 35/50

Referência da amostra	Condições de envelhecimento		
	Não envelhecido	Após 5h PAV	Após 5+20 h PAV
	Cociente entre a temperatura anel e bola dos mástiques e a temperatura anel e bola do betume utilizado no mástique		
35/50	---	---	---
35/50 + 0,2 Chda	1,15	1,11	1,06
35/50 + 0,2 Chca	1,06	1,06	1,01
35/50 + 0,2 Cem	1,06	1,08	1,02
35/50 + 0,2 FC1	1,05	1,04	1,03
35/50 + 0,2 FRC1	1,06	1,05	1,04
35/50 + 0,2 FRG1	1,06	1,07	1,04
35/50 + 0,2 FRG5	1,07	1,07	1,04

Tabela 6.38 Relação entre as temperaturas anel e bola dos mástiques e do betume PMB 45/80-60

Referência da amostra	Condições de envelhecimento		
	Não envelhecido	Após 5h PAV	Após 5+20 h PAV
	Cociente entre a temperatura anel e bola dos mástiques a temperatura anel e bola do betume utilizado no mástique		
PMB 45/80-60	---	---	---
PMB 45/80-60 + 0,2 Chda	1,16	1,10	1,01
PMB 45/80-60 + 0,2 Chca	1,09	1,09	1,04
PMB 45/80-60 + 0,2 Cem	1,08	1,07	1,04
PMB 45/80-60 + 0,2 FC1	1,07	1,08	1,05
PMB 45/80-60 + 0,2 FRC1	1,09	1,09	1,06
PMB 45/80-60 + 0,2 FRG1	1,09	1,10	1,08
PMB 45/80-60 + 0,2 FRG5	1,09	1,10	1,15

Nas figura 6.59 e 6.60 são apresentados gráficos que permitem avaliar o acréscimo da temperatura anel e bola de betumes e mástiques betuminosos, em percentagem, e para os dois estados de envelhecimento, relativamente às amostras sem envelhecimento.

Dado a grande diferença observada nos valores obtidos para os dois betumes, não foi possível apresentar os gráficos com a mesma escala.

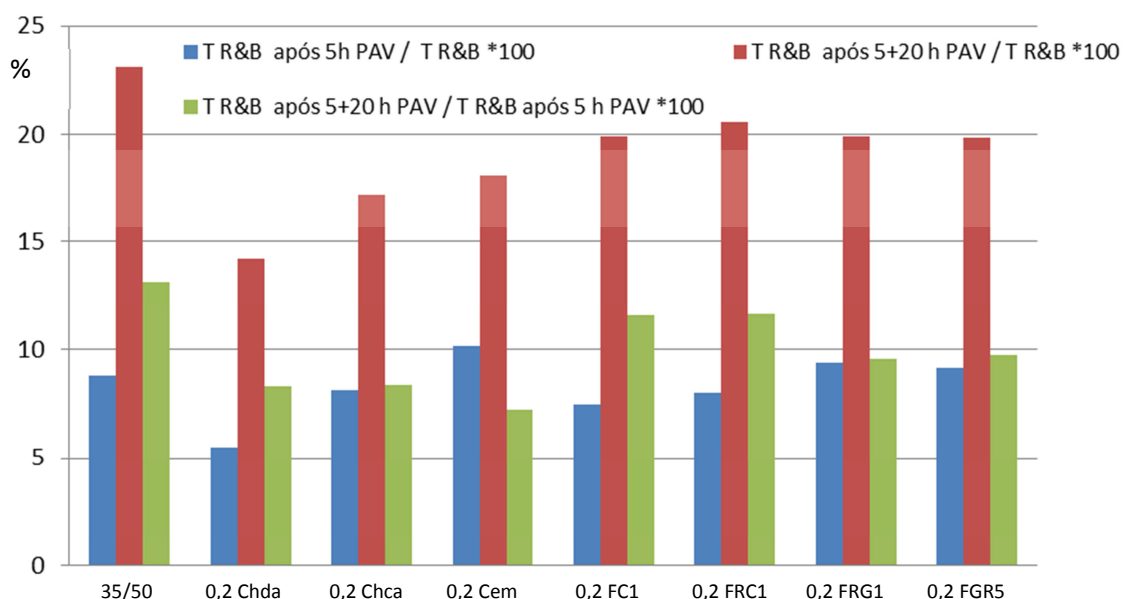


Figura 6.59 Relação entre as temperatura anel e bola do betume 35/50 e dos mástiques respectivos, após e antes envelhecimento

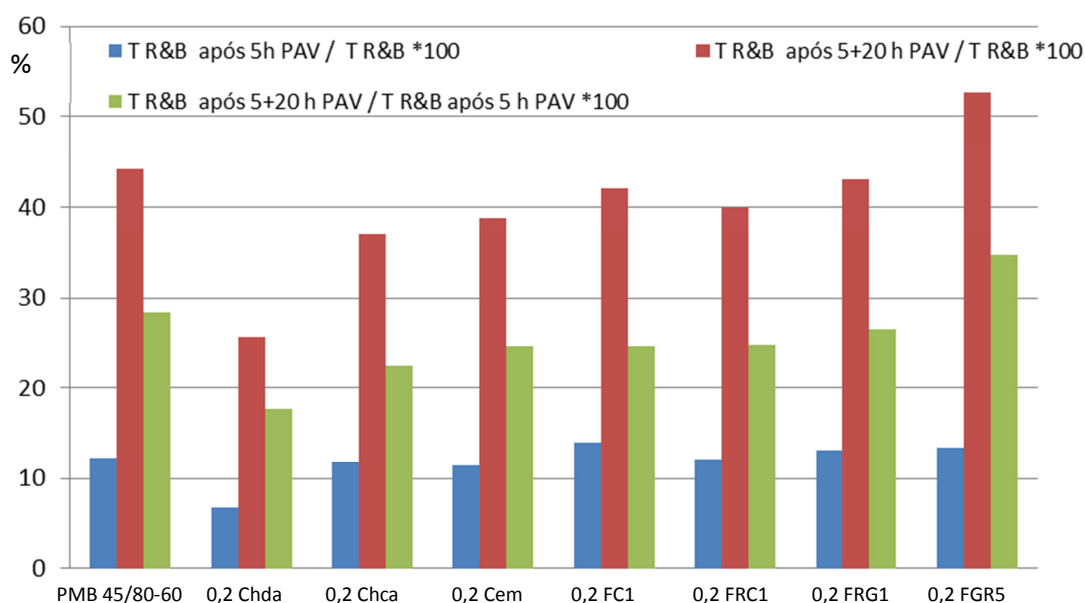


Figura 6.60 Relação entre as temperaturas anel e bola do betume PMB 45/80-60 e mástiques respectivos, após e antes envelhecimento

As tabelas e as figuras apresentadas permitem estabelecer as seguintes conclusões:

- todos os mástiques apresentam, para as três condições de envelhecimento, valores da temperatura anel e bola superiores aos betumes que lhes deram origem;
- o comportamento ao envelhecimento dos diferentes mástiques é influenciado pelo tipo de filer utilizado. Este aspeto foi defendido por Recasens em 1994, através dos resultados obtidos em ensaios de misturas betuminosas;
- para o betume 35/50, os mástiques produzidos com cal hidratada são os que apresentam maior valor da temperatura anel e bola, para qualquer uma das condições de envelhecimento;
- para o mesmo betume, os valores mínimos da temperatura anel e bola são observados para o mástique com filer calcário, para as condições não envelhecido e envelhecido a curto prazo, e para o mástique com cal hidráulica para a situação de envelhecimento a longo prazo;
- para o betume modificado PMB 45/80-60 os valores máximos da temperatura anel e bola são observados para o mástique com cal hidratada, para as situações não envelhecido e para um envelhecimento após 5 h PAV, ou seja, a curto prazo, e para o mástique com o filer recuperado de granito FRG5, no caso do envelhecimento a longo prazo;

- para o betume modificado os valores mínimos da temperatura anel e bola são observados para os mástiques com o filer comercial de calcário, cimento e cal hidratada, respetivamente para as situações de não envelhecido, envelhecido a curto prazo e envelhecido a longo prazo;
- os mástiques betuminosos apresentam, percentualmente, menores incrementos da temperatura anel e bola que os betumes após envelhecimento a longo prazo. Quer isto dizer que os fileres funcionam como retardadores do envelhecimento do betume, ajudando a fixar os elementos mais voláteis do betume;
- para todos os mástiques produzidos, o que apresenta menor incremento da temperatura anel e bola após envelhecimento a curto prazo, relativamente ao mástique não envelhecido, é o produzido com cal hidratada. A amostra que apresenta maior incremento é o mástique produzido com cimento Portland, no caso do betume 35/50, e o produzido com filer comercial calcário, no caso do betume PMB 45/80-60;
- já no que diz respeito ao envelhecimento a curto e a longo prazo é também a cal hidratada o filer que contribui, percentualmente, para um menor envelhecimento do mástique betuminoso. Os mástiques que observam maior incremento da temperatura anel e bola são os produzidos com o filer comercial de calcário e com os fileres recuperados em central;
- a cal hidratada apresenta-se como o filer que contribui para um menor incremento da temperatura anel e bola, no que se refere ao envelhecimento do mástique a curto e a longo prazo. Esta será, provavelmente, uma das razões pelas quais muitas instituições defendem a sua utilização nas misturas betuminosas mais sujeitas ao envelhecimento, como por exemplo as misturas betuminosas do tipo drenante, misturas abertas e outros tipos de misturas que constituem a camada de desgaste dos pavimentos.

6.2.2.3. Ensaios com reómetro de corte

Para analisar a influência do tipo de filer na reologia dos mástiques betuminosos, foram realizados ensaios de corte, do tipo oscilatório, com reómetro de corte dinâmico, de pratos circulares e paralelos.

Os ensaios foram realizados no laboratório CIESM-INTEVIA em Madrid, para os betumes 35/50 e PMB 45/80-60 e para os seguintes mástiques betuminosos:

- betume 35/50 e fileres: Chda, Chca, Cem, FC1, FRC1, FRG1 e FRG5;
- betume PMB 45/80-60 e fileres: Chda, Chca, Cem, FC1, FRC1, FRG1 e FRG5.

Todos os mástiques foram produzidos com uma relação volumétrica filer/mástique de 0,2.

Os ensaios foram realizados para tensão de corte constante, com varrimento de frequências entre 10 e 0,01 Hz, por esta ordem, ou seja, começando pelas frequências mais elevadas, e para 9 patamares de temperatura, de 5 a 85 °C com incrementos de 10 °C.

Nos ensaios foram utilizados dois tipos de pratos: com 8 mm de diâmetro, para provetes com 1 mm de altura, adotados para os patamares de temperatura mais baixos, e pratos com 25 mm de diâmetro, correspondentes a provetes com 2 mm de espessura, utilizados nos ensaios a temperaturas mais elevadas.

Para as temperaturas intermédias de 25, 35 e 45 °C houve o cuidado de realizar ensaios com os dois tipos de pratos, de modo a quantificar as diferenças de resultados obtidas, e assim avaliar a influência da geometria dos pratos nos resultados dos ensaios.

Inicialmente foram realizados ensaios prévios, com a aplicação de valores de tensão de corte entre os 100 e 25 000 Pa, de modo a seleccionar o valor máximo de tensão de corte a adotar para os ensaios, capaz de garantir o comportamento linear da variação da rigidez. Foram seleccionados os valores de 3 000 Pa, para o betume modificado e respetivos mástiques, e de 4 000 Pa para o betume 35/50 e respetivos mástiques betuminosos.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados ao betume 35/50 e mástiques betuminosos produzidos com este betume, são apresentados nos diagramas de Black definidos nas figuras 6.61 a 6.68.

Nas figuras 6.69 a 6.76 são apresentados os diagramas de Black, definidos através dos resultados obtidos nos ensaios realizados ao betume PMB 45/80-60 e mástiques betuminosos produzidos com este betume.

Este tipo de diagrama permite estabelecer a relação entre os valores da rigidez e do ângulo de fase das amostras, para todas as temperaturas ensaiadas.

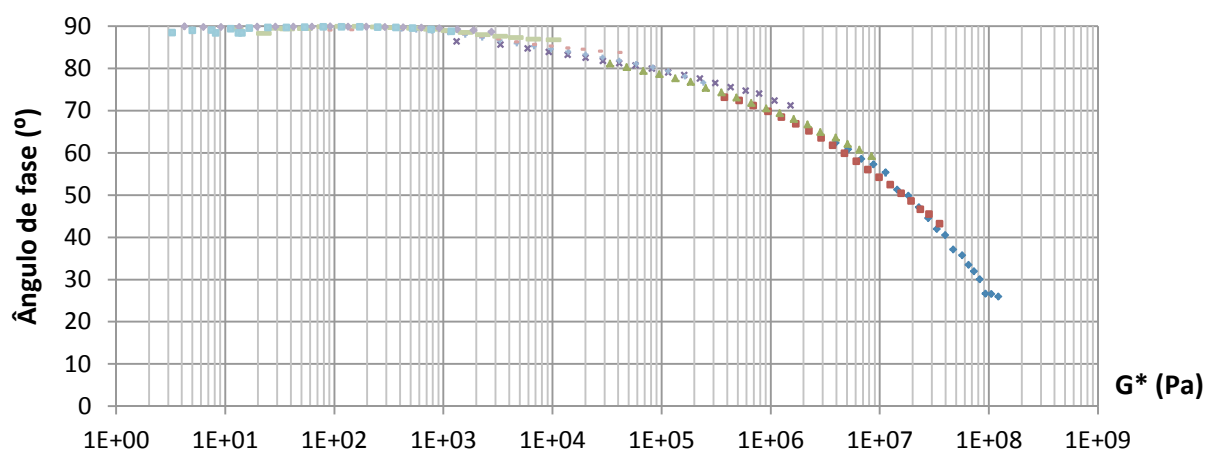


Figura 6.61 Diagrama de Black do betume 35/50

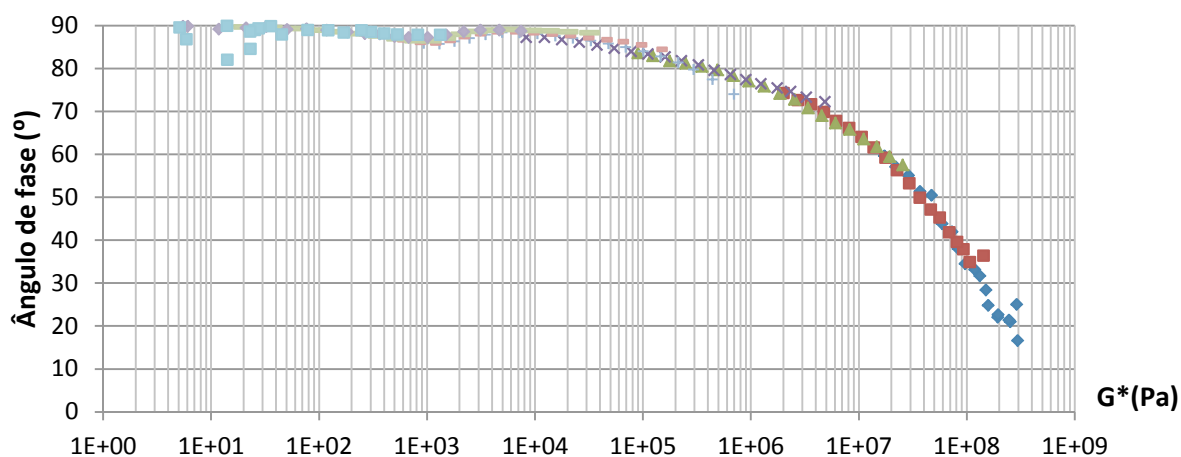


Figura 6.62 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 Chda

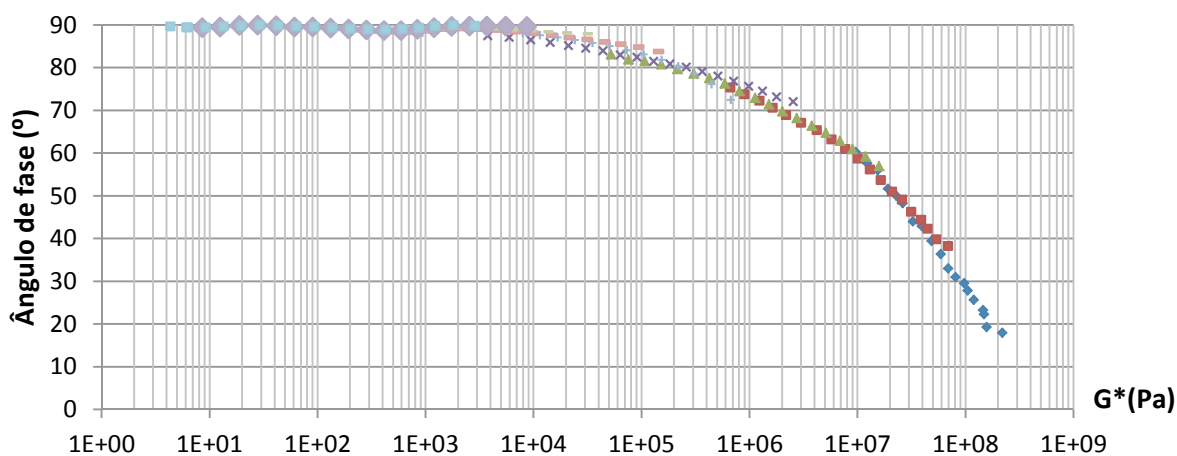


Figura 6.63 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 Chca

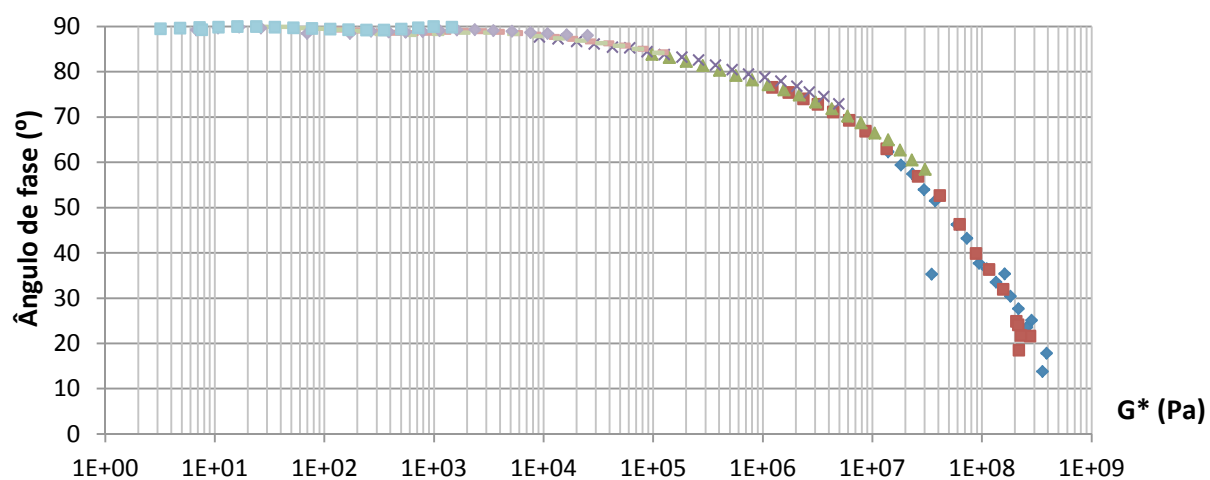


Figura 6.64 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 Cem

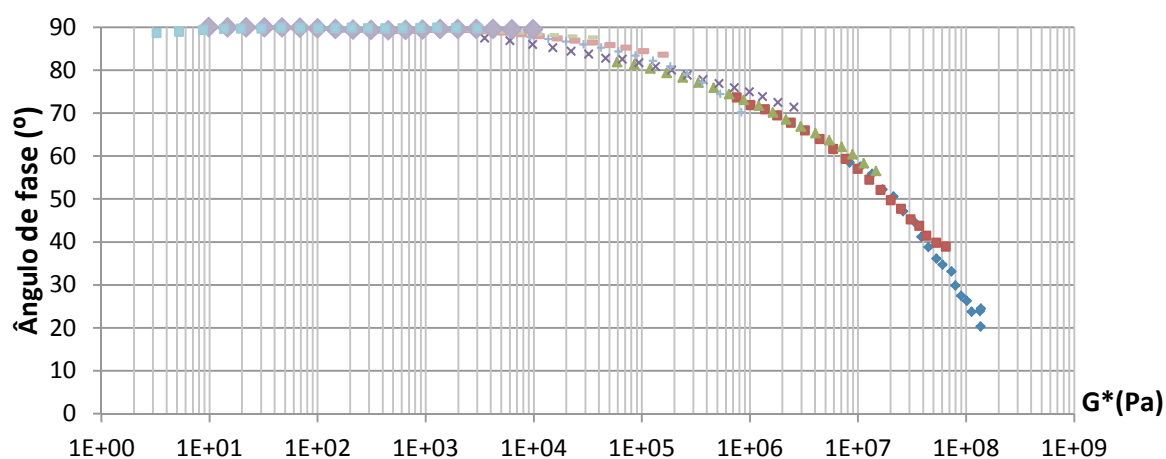


Figura 6. 65 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FC1

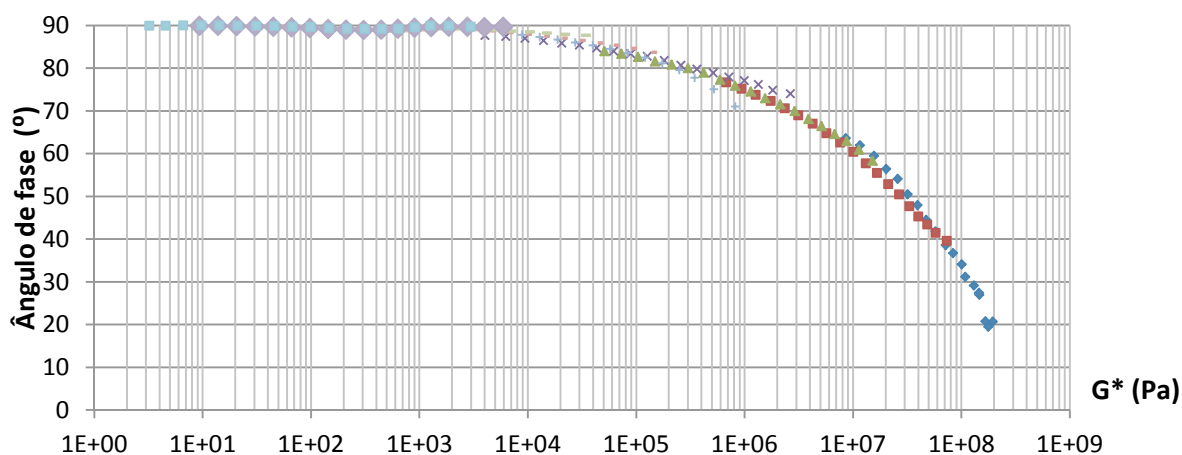


Figura 6.66 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FRC1

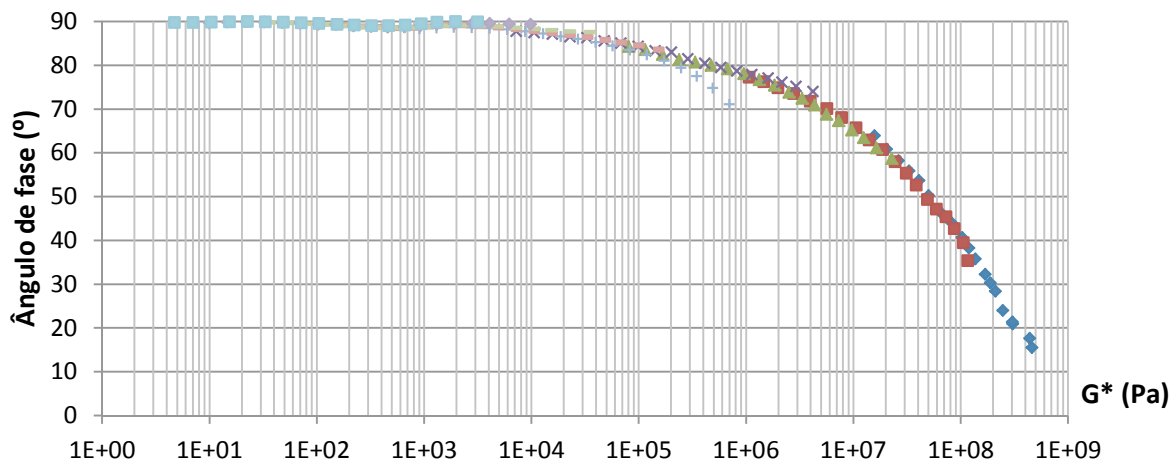


Figura 6.67 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FRG1

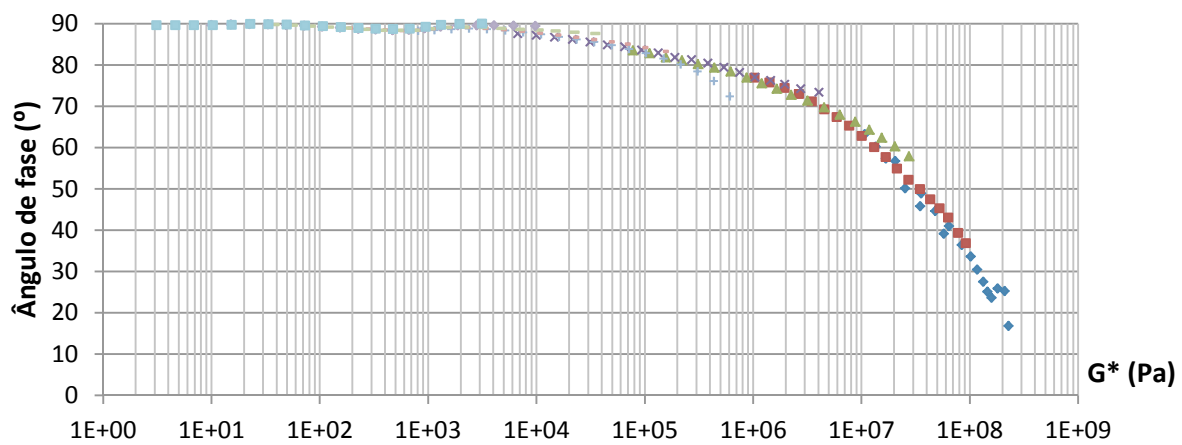


Figura 6.68 Diagrama de Black do mástique 35/50 com 0,2 FRG5

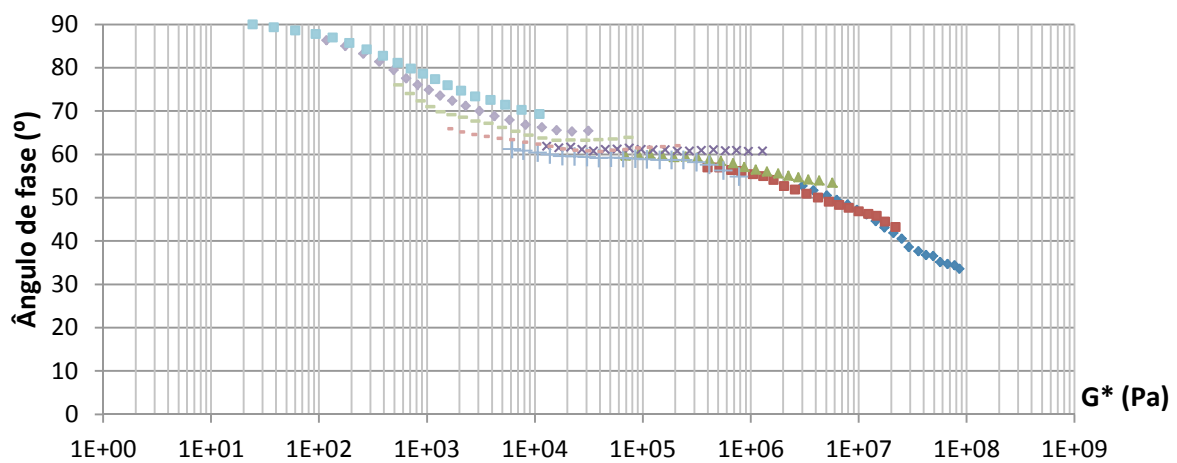


Figura 6.69 Diagrama de Black do betume PMB 45/80-60

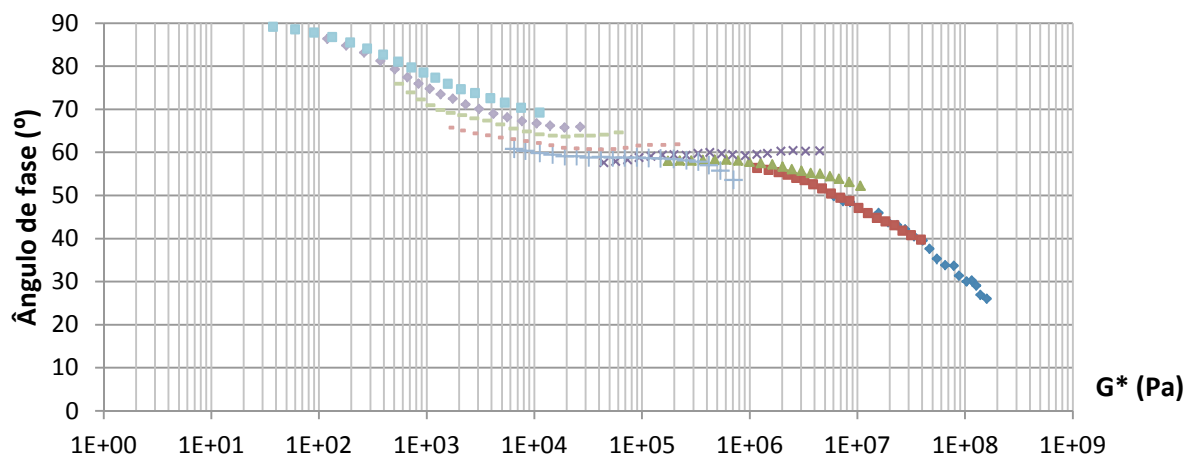


Figura 6.70 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Chda

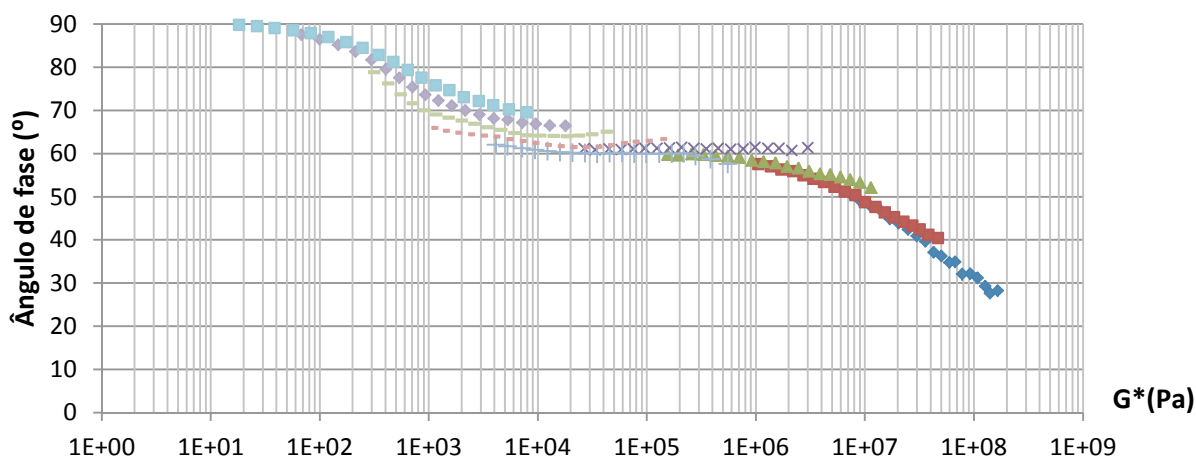


Figura 6.71 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Chca

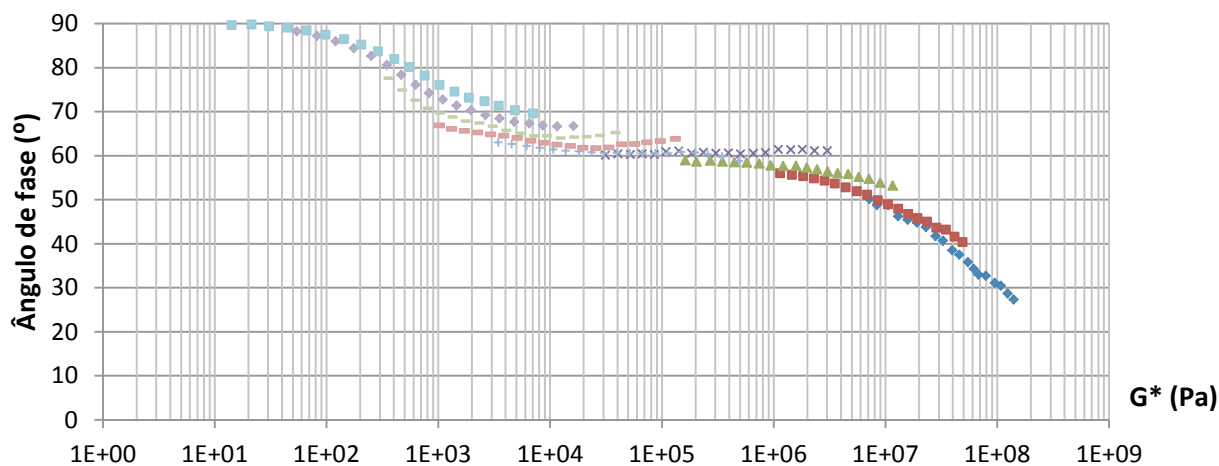


Figura 6.72 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 Cem

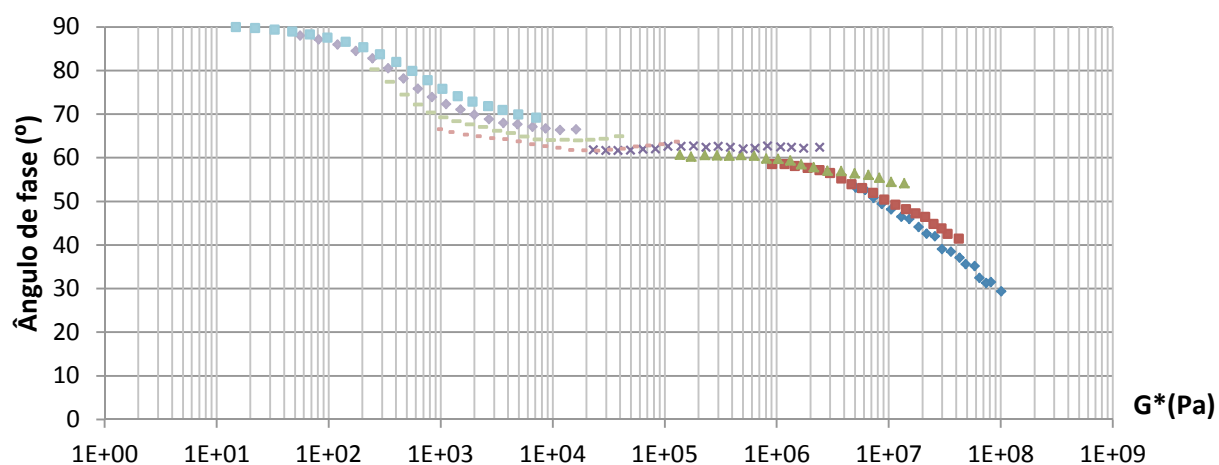


Figura 6.73 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FC1

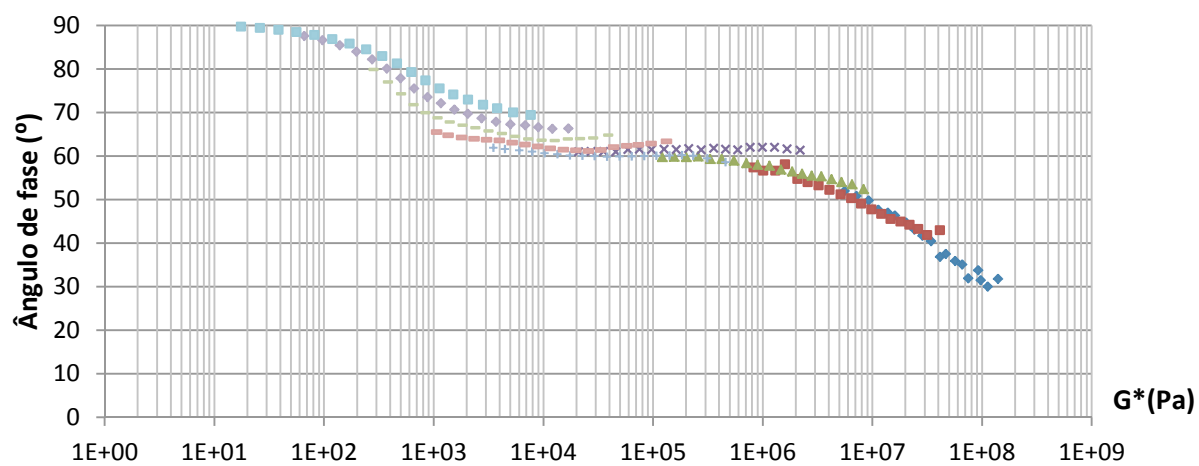


Figura 6.74 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRC1

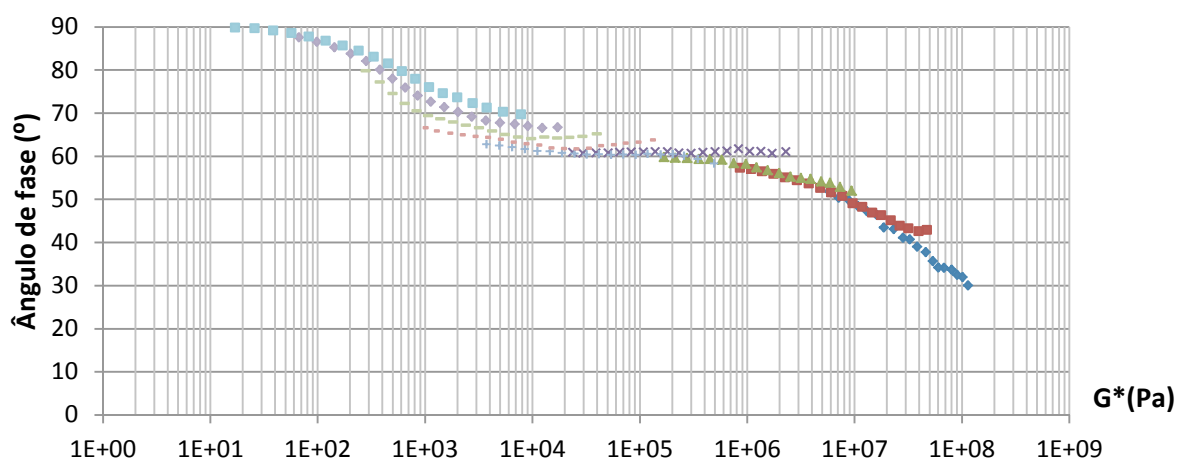


Figura 6.75 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG1

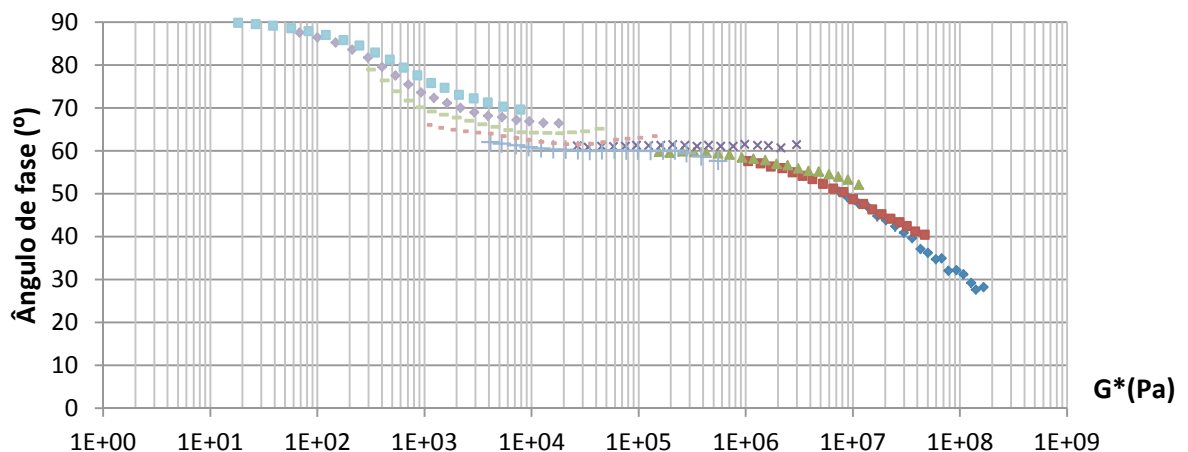


Figura 6.76 Diagrama de Black do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG5

Os diagramas de Black, ou diagramas de “*Black space*”, são representações semilogarítmicas que relacionam a rigidez e o ângulo de fase do mástique betuminoso, e são obtidos através dos resultados dos ensaios com reômetro de corte, para todas as temperaturas e frequências ensaiadas. Esta curva, ao contrário das curvas mestras, não requerem qualquer tipo de deslocamento, já que são obtidas pela sobreposição de curvas independentes dos valores da temperatura e da frequência dos ensaios. Estas representações expressam, de forma muito clara, a variação da reologia dos mástiques betuminosos, sendo possível observar de que modo evolui a diminuição do ângulo de fase e o aumento da rigidez com a diminuição da temperatura. Estes diagramas apresentam um traçado descontínuo sempre que ocorre uma ou várias das seguintes situações:

- estabelecidos parâmetros de ensaio para condições de não linearidade, aspecto não observado nos ensaios realizados dado o cuidado colocado na realização de ensaios prévios para diferentes valores da tensão de corte;
- ensaios realizados em amostras que apresentam reologia complexa, situação observada neste trabalho para o betume PMB 45/80-60 e mástiques com ele produzidos;
- definição de condições de ensaio fora do intervalo correspondente à resolução do equipamento, situação não observada nos ensaios.

Para os diagramas apresentados foram eliminados alguns valores, correspondentes às temperaturas de 25, 35 e 45 °C, para as quais foram utilizados os dois tipos de pratos.

Nas figuras 6.77 a 6.92 são apresentadas as isócronas da rigidez e do ângulo de fase, para as frequências de 0,01, 0,1, 1 e 10 Hz, e para os betumes e mástiques ensaiados.

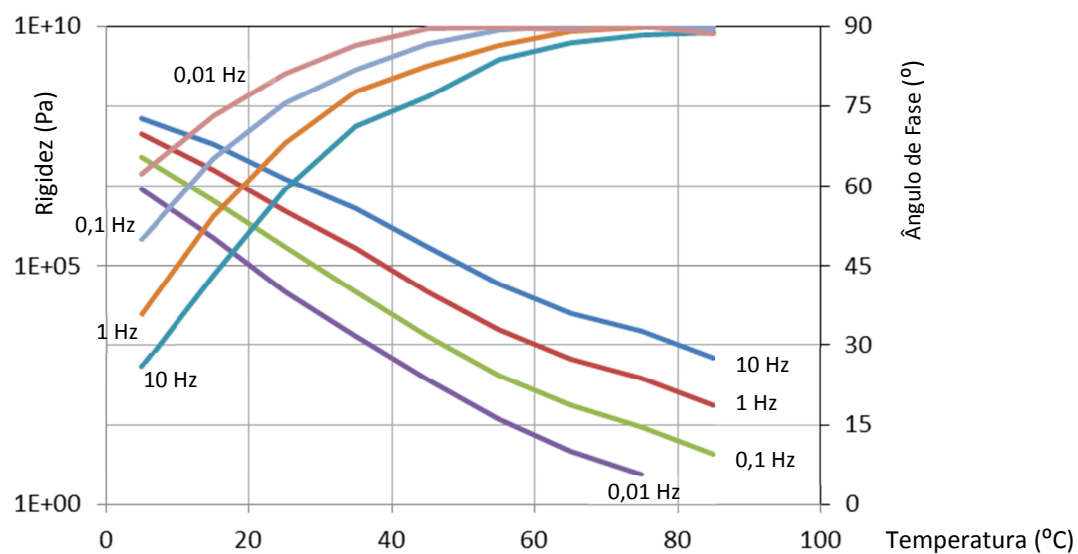


Figura 6.77 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do betume 35/50

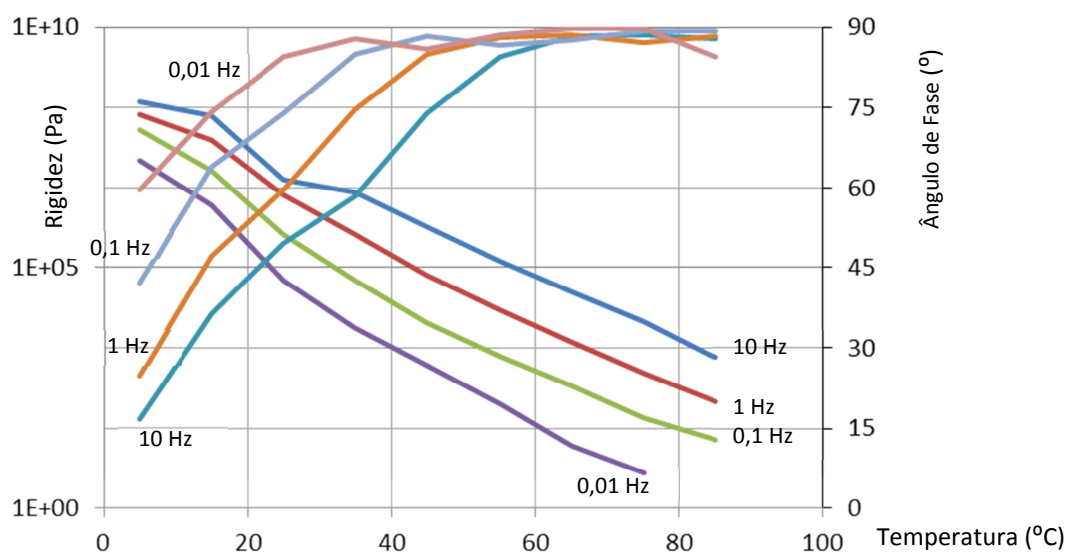


Figura 6.78 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 Chda

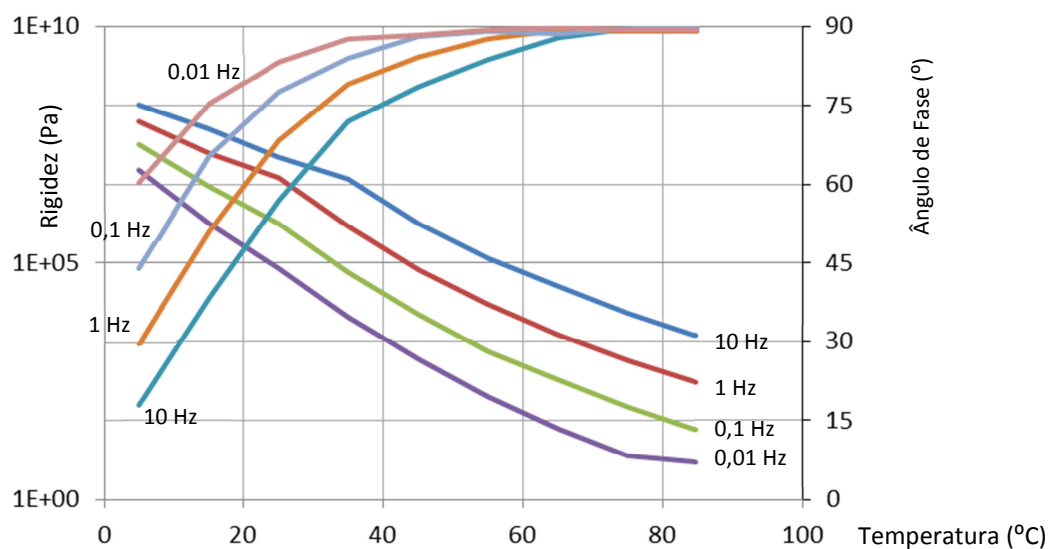


Figura 6.79 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 Chca

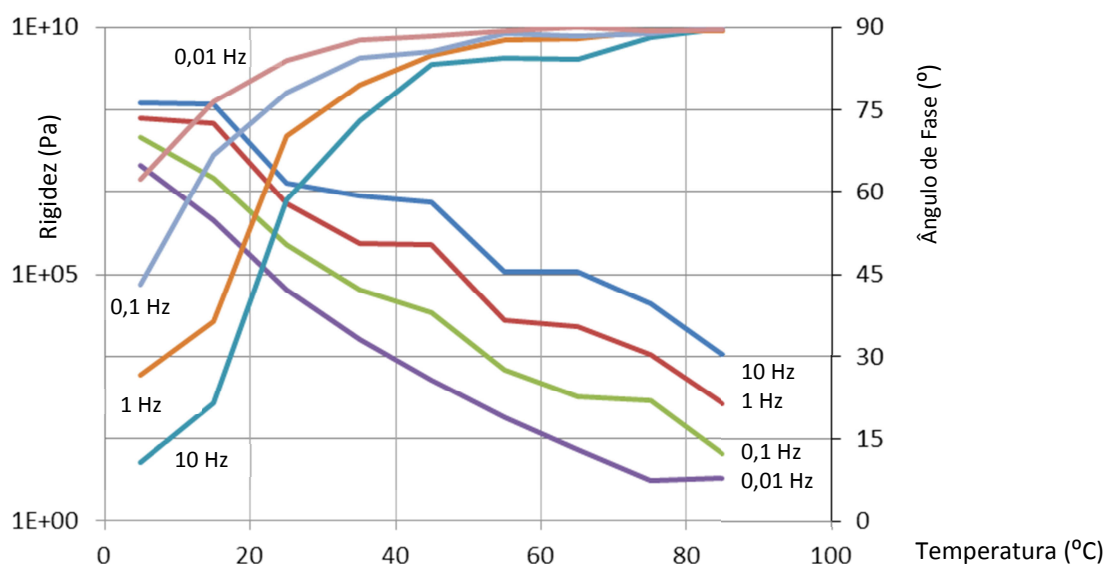


Figura 6.80 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 Cem

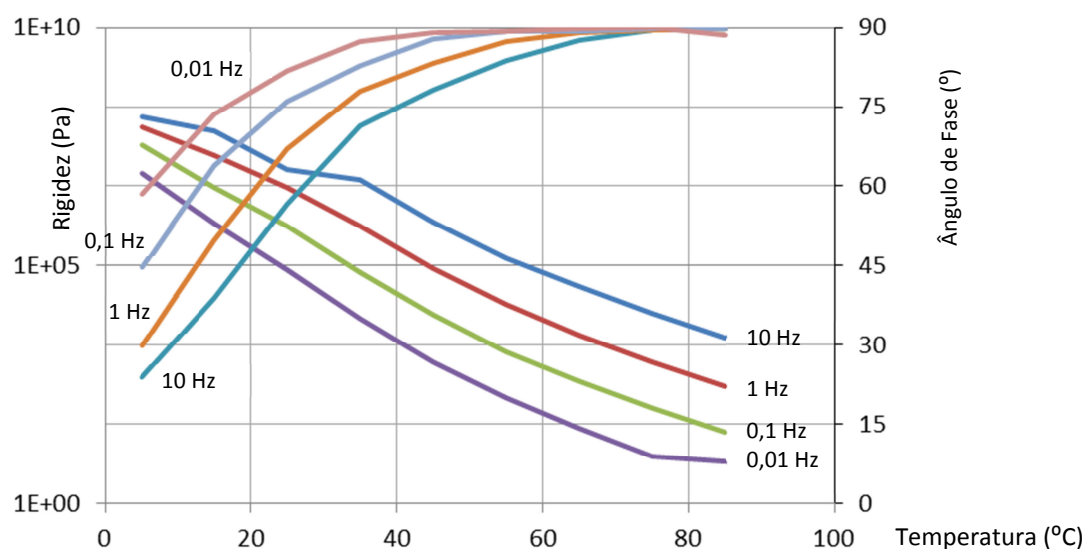


Figura 6.81 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FC1

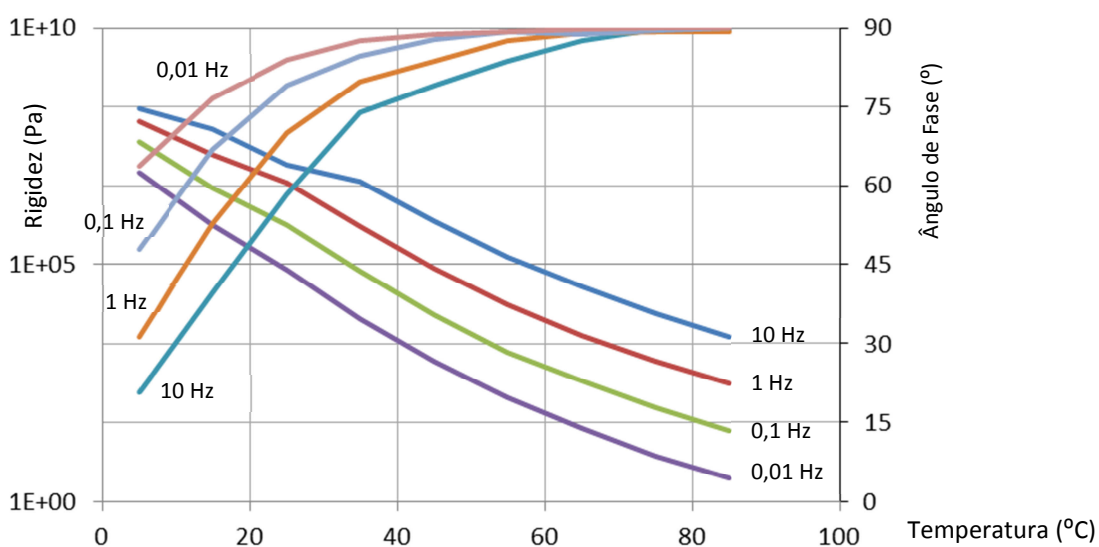


Figura 6.82 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FRC1

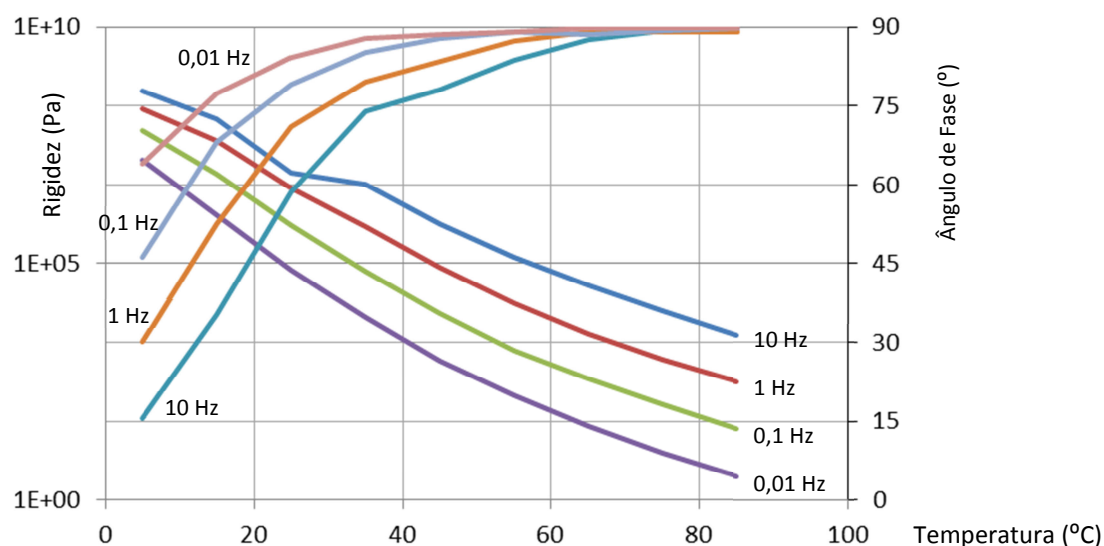


Figura 6.83 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FRG1

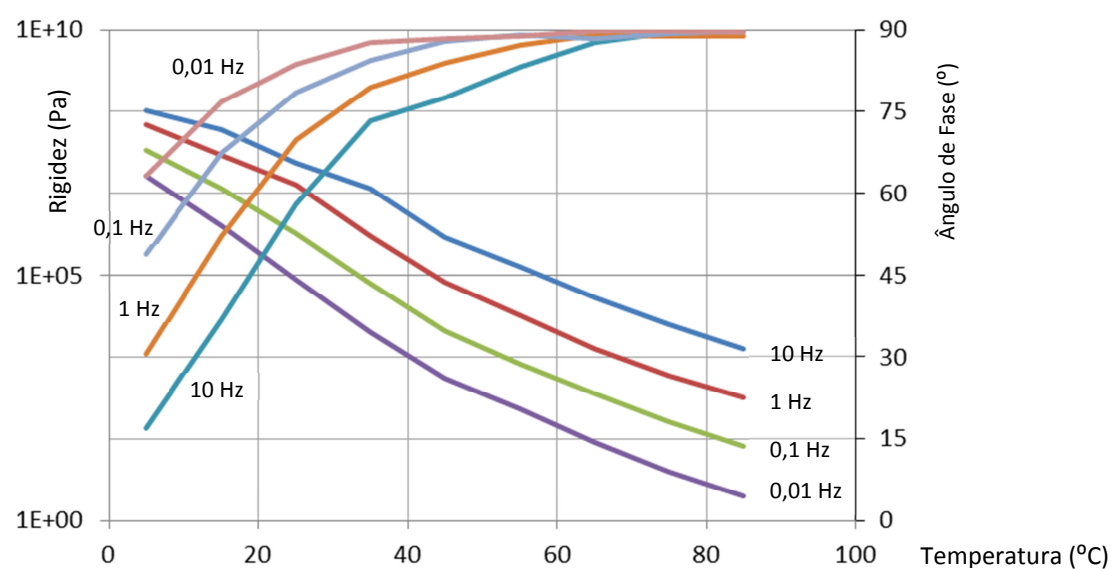


Figura 6.84 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique 35/50 com 0,2 FRG5

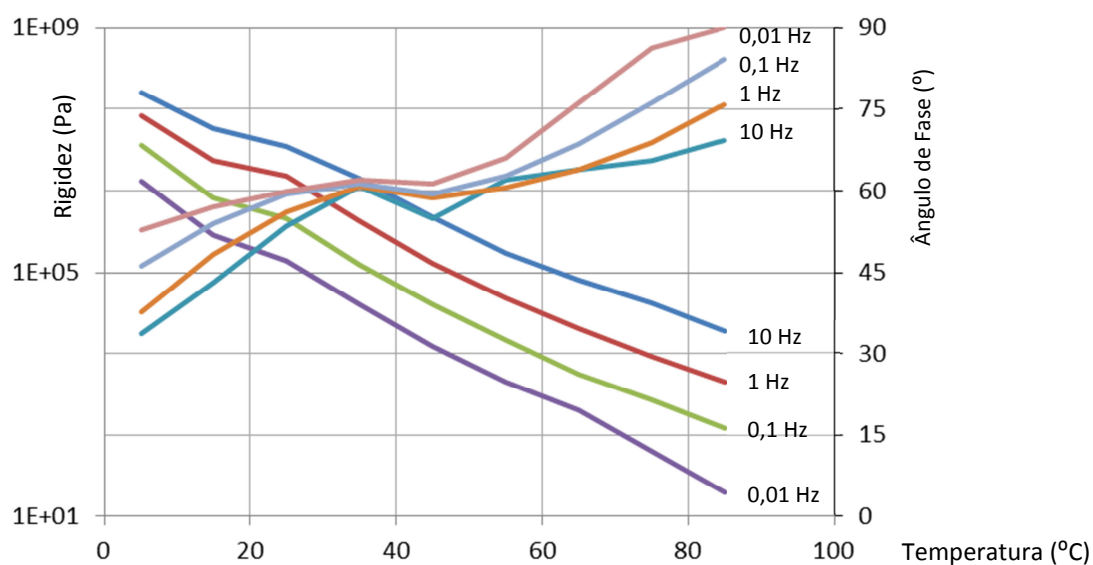
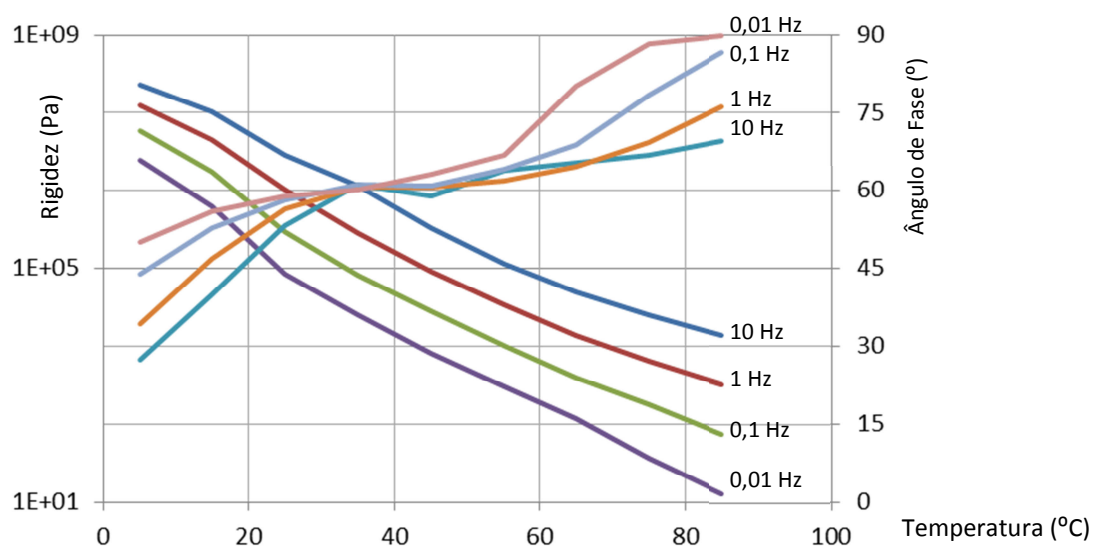
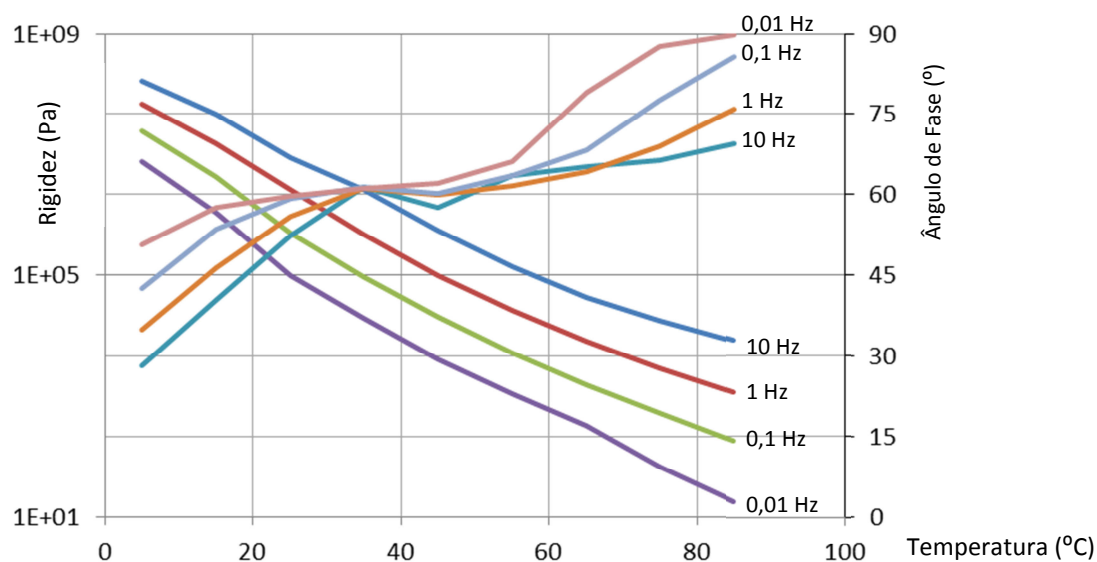
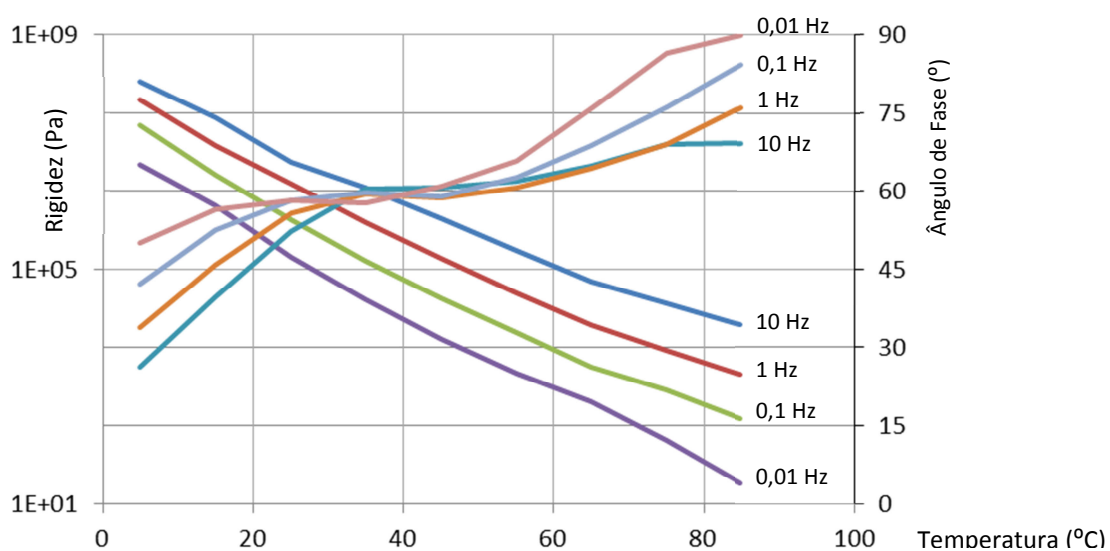


Figura 6.85 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do betume PMB 45/80-60



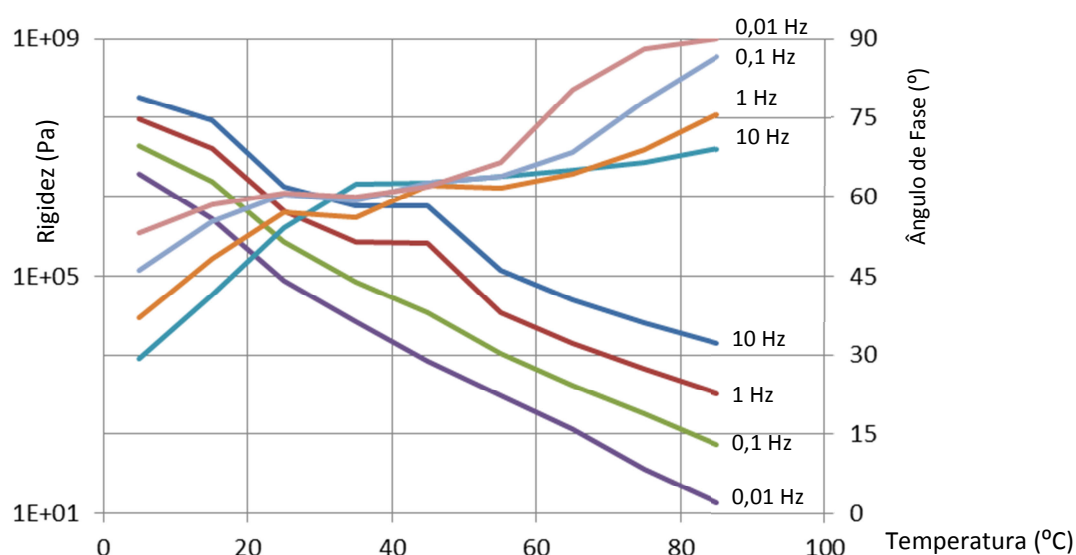


Figura 6.89 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FC1

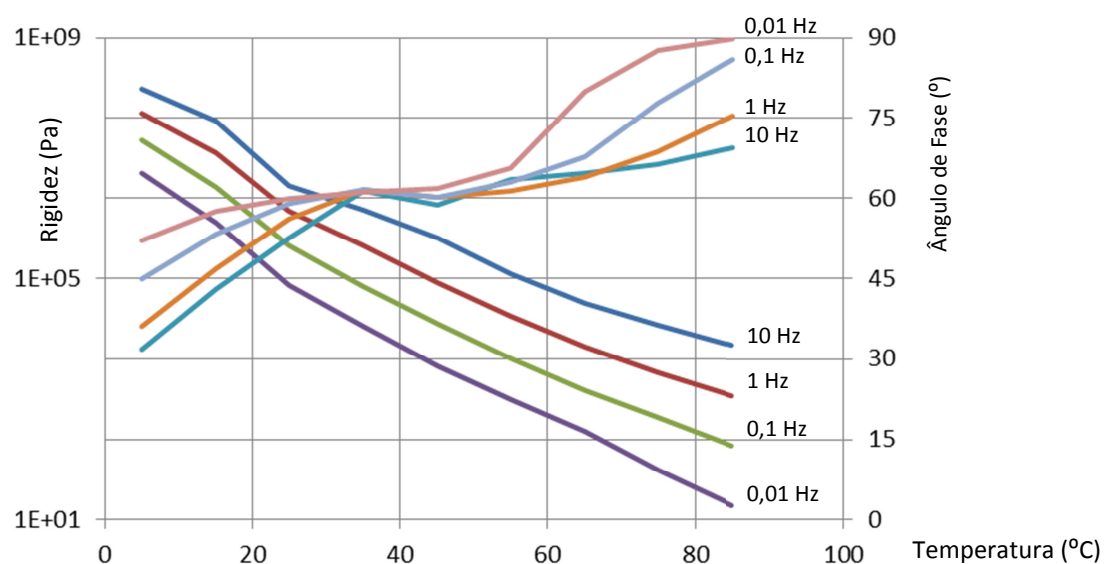


Figura 6.90 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRC1

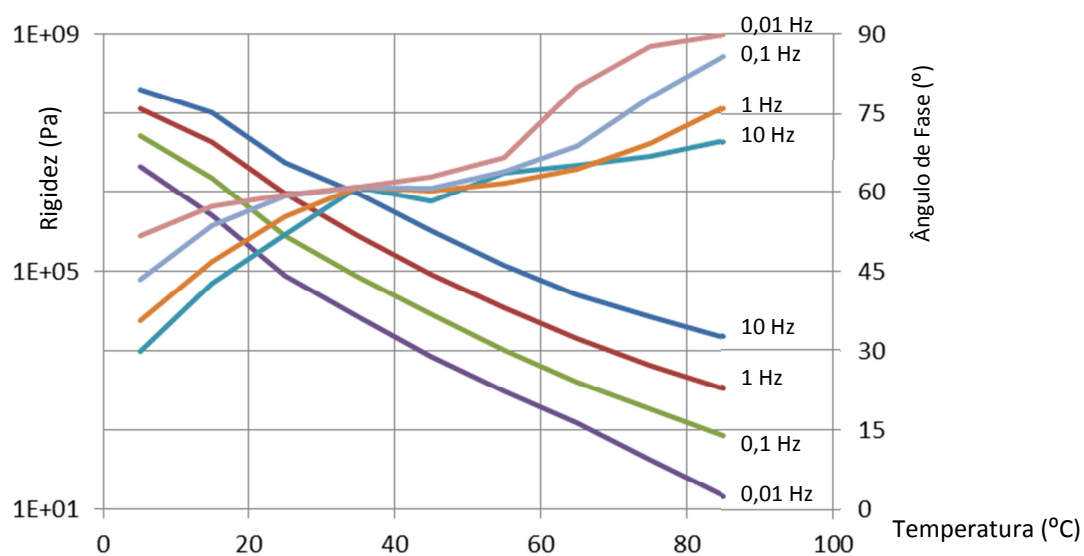


Figura 6.91 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG1

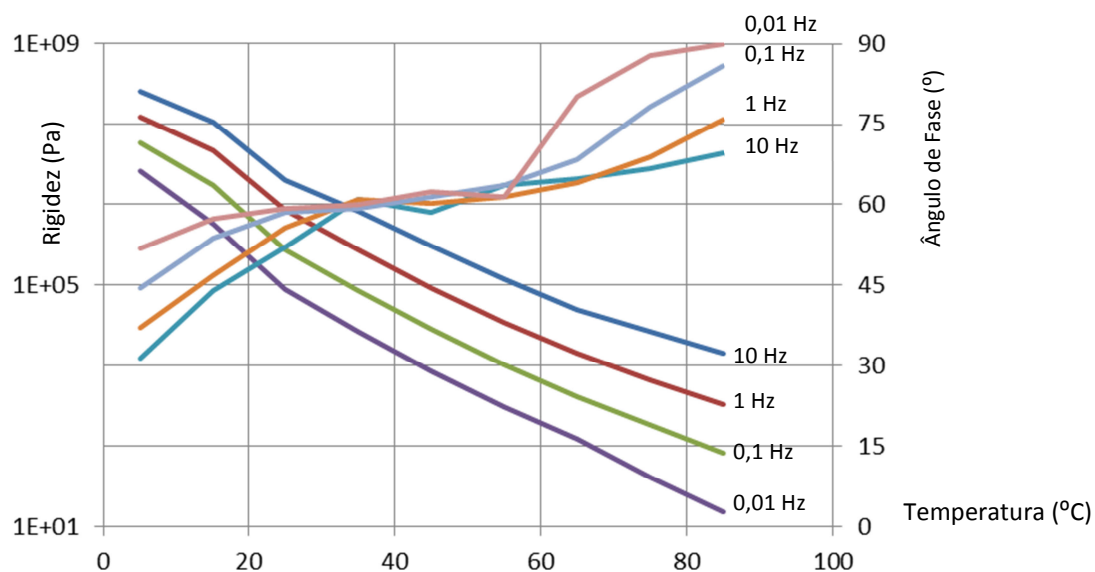


Figura 6.92 Isócronas da rigidez e ângulo de fase do mástique PMB 45/80-60 com 0,2 FRG5. Estas curvas permitem estabelecer a variação da rigidez e do ângulo de fase com a temperatura e a frequência de aplicação do carregamento.

Nas figuras 6.93 e 6.94 estão representadas as isócronas da rigidez, para a frequência de 10 Hz, para os betumes e mástiques ensaiados.

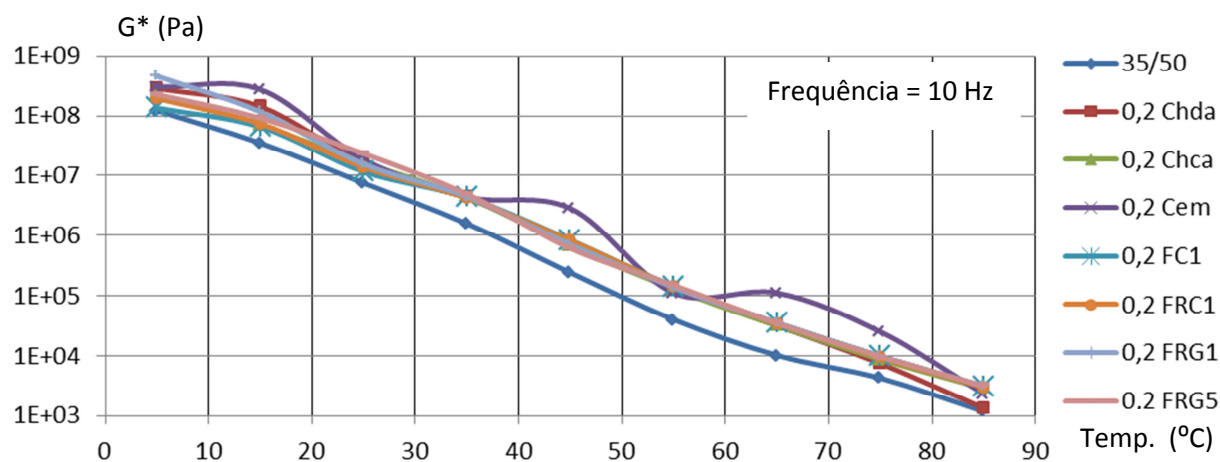


Figura 6.93 Isócronas da rigidez do betume 35/50 e respectivos mástiques para a frequência de 10 Hz

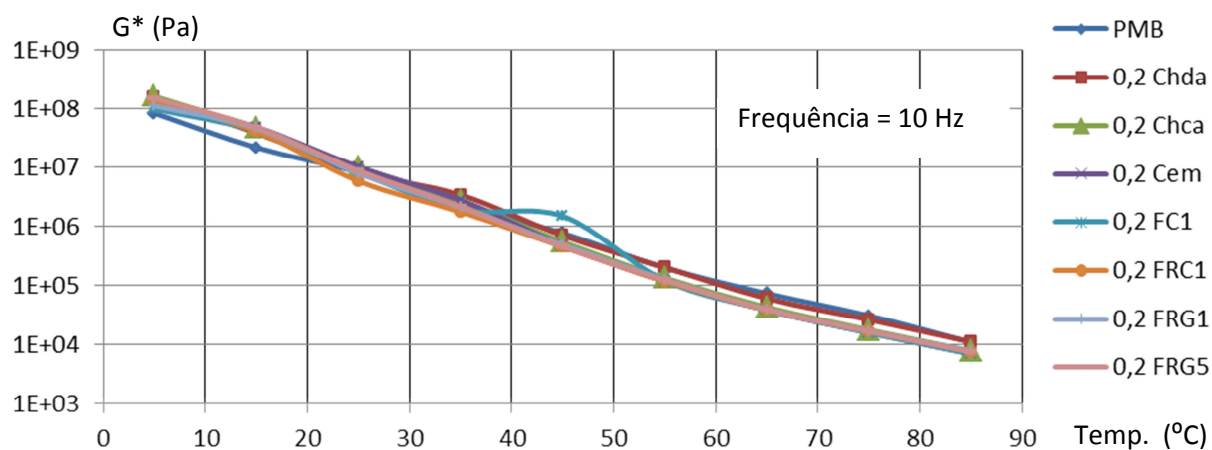


Figura 6.94 Isócronas da rigidez do betume PMB 45/80-60 e respectivos mástiques para a frequência de 10 Hz

Nas figuras 6.95 e 6.96 são apresentadas as isotérmicas da rigidez para três patamares de temperatura, 15, 45 e 65 °C, representando a variação da rigidez dos diferentes betumes e mástiques betuminosos, em função da frequência do carregamento.

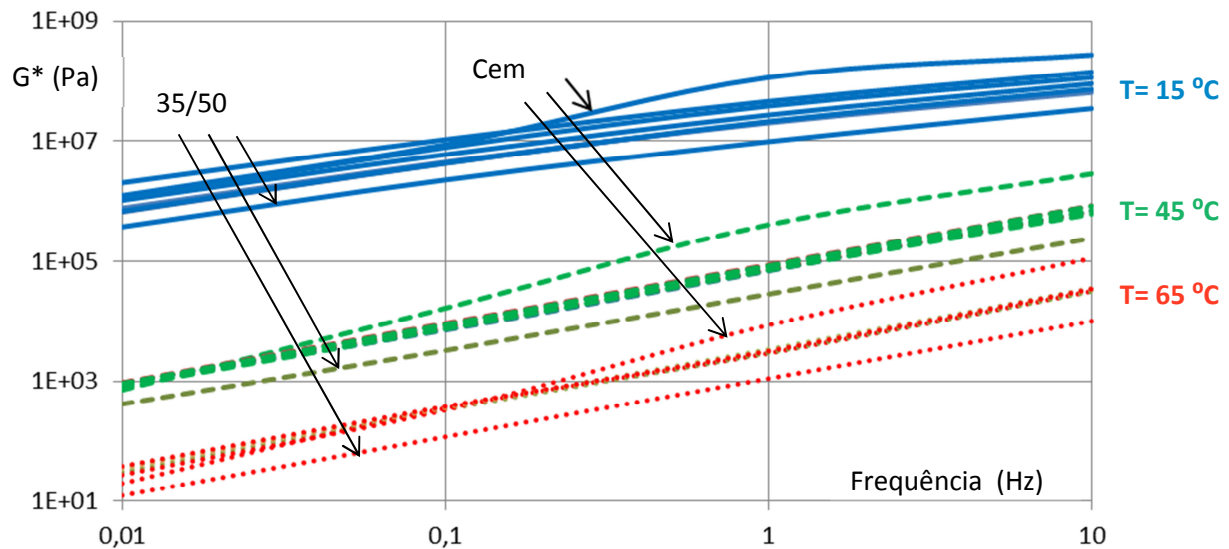


Figura 6.95 Isotérmicas do betume 35/50 e mástiques respectivos

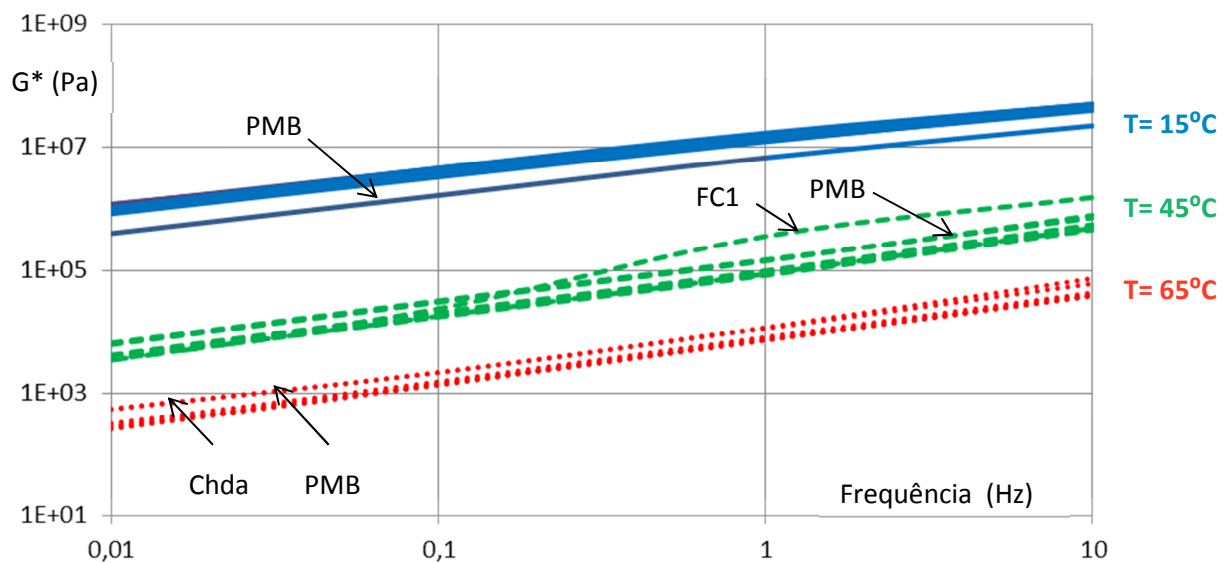


Figura 6.96 Isotérmicas do betume PMB 45/80-60 e mástiques respectivos

A análise aos gráficos apresentados permite concluir o seguinte:

- todos os mástiques apresentam valores de rigidez distintos dos valores observados para os respectivos betumes. Este aspeto foi igualmente observado por Huang *et al.*, em 2007, tendo o autor concluído da existência de efeitos físicos e químicos de reforço nos mástiques betuminosos, devidos ao filler;

- todos os mástiques produzidos com o betume 35/50 apresentam valores de rigidez superiores aos valores obtidos para o betume. No entanto, esse acréscimo de rigidez, não é muito significativo para o valor da concentração do filer utilizado nos ensaios realizados. Esta conclusão foi igualmente observada em 2012 por Muniandy *et al.*;
- no caso dos mástiques produzidos com betume 35/50, e para qualquer valor da temperatura, o cimento e os fileres recuperados de granito são os que conduzem a mástiques mais rígidos, sendo o aumento mais significativo para temperaturas mais elevadas. Por outro lado, os fileres de calcário produzem mástiques de menor rigidez. Os restantes fileres provocam efeitos muito semelhantes no aumento da rigidez do betume, verificando-se, no entanto, valores ligeiramente superiores para o caso da cal hidratada e da cal hidráulica. Este aspeto vem comprovar a conclusão apresentada por Prowell *et al.*, 2005, que a finura do filer não é a única característica do filer a influenciar a rigidez do mástique betuminoso;
- no que diz respeito aos mástiques produzidos com o betume modificado, verifica-se que para temperaturas inferiores a 20 °C, todos os mástiques apresentam rigidez superior à do betume. No entanto, para temperaturas entre 20 e 40 °C, os dois materiais apresentam valores da rigidez muito semelhantes, e para temperaturas superiores a 40 °C, todos os mástiques apresentam rigidez inferior à do betume, exceto o produzido com cal hidratada que apresenta um valor de rigidez semelhante ao obtido para o ligante. Quer isto dizer que os mástiques se tornam mais suscetíveis à temperatura que os betumes, e desta forma, quanto maior a concentração do filer no mástique, maior a suscetibilidade à temperatura por parte deste material. Salienta-se no entanto que as diferenças observadas no valor da rigidez dos diferentes mástiques não são muito significativas, concluindo-se assim, que o comportamento de um mástique betuminoso produzido com betume modificado é pouco influenciado pelo tipo de filer utilizado.
- o comportamento reológico dos mástiques é definido fundamentalmente pelo tipo de betume utilizado;
- os dois tipos de betumes utilizados neste trabalho apresentam valores do ângulo de fase bem distintos. Na realidade, o ângulo de fase do betume 35/50, para além de ser muito variável com a frequência de aplicação do carregamento, cresce de forma muito acentuada com o aumento de temperatura entre os 5 e os 40 °C, verificando-se, para este patamar de temperatura, um valor do ângulo de fase superior a 75°

para todas as frequências ensaiadas. Já para o betume modificado, o ângulo de fase observado para os mástiques betuminosos, para além de ser menos influenciado pelo valor da frequência aplicado, observa, com o aumento da temperatura, um crescimento menos acentuado, estabilizando num valor próximo dos 60° , entre os 35 e os 55 $^\circ\text{C}$. A figura 6.97 apresenta os diagramas Black dos dois betumes, de forma sobreposta, sendo possível visualizar a diferença de comportamento entre o betume puro e o betume modificado.

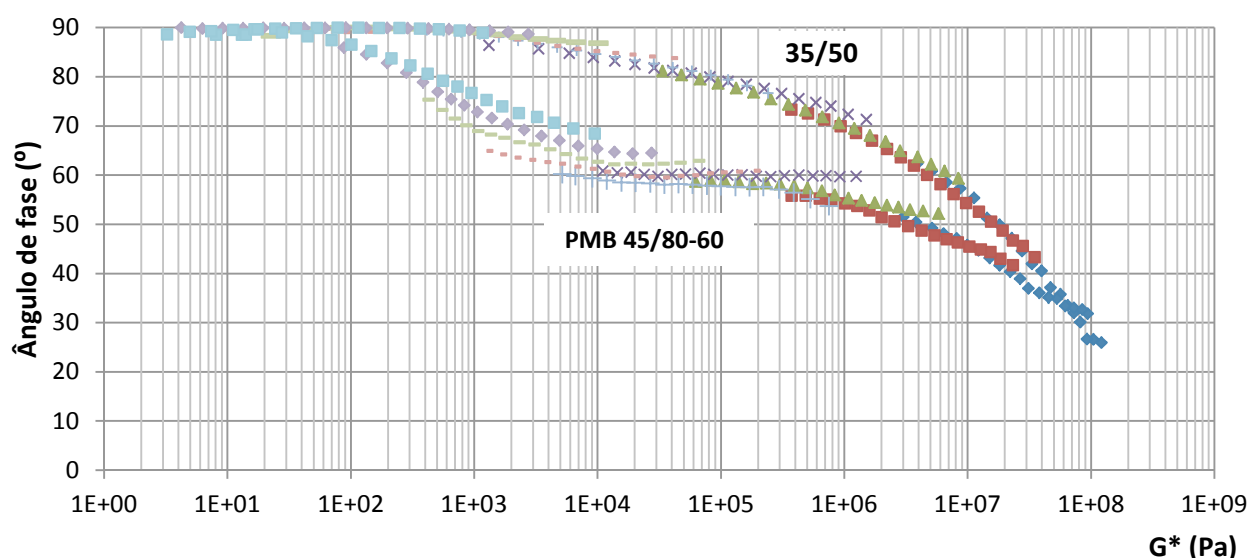


Figura 6.97 Diagramas de Black dos betumes 35/50 e PMB 45/80-60

- o comportamento dos diferentes mástiques é muito semelhante ao comportamento do betume que lhes deram origem. No entanto, verifica-se para o mástique produzido com betume 35/50 e a cal hidratada, um menor ângulo de fase para valores de temperatura mais baixos, nomeadamente entre 25 e 45 $^\circ\text{C}$. Para os mástiques produzidos com o betume PMB 45/80-60 verifica-se um comportamento, no que diz respeito ao ângulo de fase, semelhante para todos eles, ou seja, independente do tipo de filer utilizado.
- conclui-se assim, que para mástiques produzidos com o mesmo betume, não se verificam grandes variações no ângulo de fase. Deste modo, tal como observado por Jiménez *et al.*, em 2011, o ângulo de fase depende essencialmente do tipo de betume utilizado no mástique, não se observando grandes variações com a alteração do filer utilizado.

6.2.2.4. Ensaios de aderência BBS

De modo a avaliar as forças adesivas e coesivas que se desenvolvem no contacto mástique betuminoso/agregado, foram realizados ensaios de tração direta, do tipo “*pull-off*”, utilizando a metodologia definida no anexo A5 da norma americana ASTM D4541-02 (2002). Foram preparadas placas de amostras de rocha recolhidas nas pedreiras, rochas essas que deram origem aos agregados, dos quais se obtiveram os fileres recuperados de central. Essas amostras foram referenciadas por RAFR (rocha do agregado do filer recuperado), seguida da letra que identifica a origem geológica da rocha e consequentemente do filer, e ainda, do mesmo número que referencia o filer. As placas, com cerca de 3 cm de espessura, foram preparadas por serragem de blocos de rocha, em serra de disco diamantada, e a superfície de ensaio foi finalizada através de polimento, em equipamento de cabeça diamantada, seguido de passagem de lixa de água de grão 600.

Por forma a remover qualquer pequeno fragmento aderido à superfície de ensaio, as placas foram mantidas, durante 60 min, em banho de água e ultrasons, à temperatura de 60 °C. Após este período, as placas e as peças metálicas de arranque estabilizaram, durante 30 min, em estufa ventilada à temperatura de 60 °C.

Findo este período, o provete de betume, ou mástique, foi colocado sobre a superfície de ensaio do pino, sendo de seguida o conjunto pressionado sobre a superfície do provete de rocha, de forma lenta e progressiva, permitindo que o betume, ou mástique, em excesso, pudesse fluir sob o pino, através dos quatro rasgos laterais existentes. Essa pressão só é anulada quando se verifica o perfeito contacto entre a base do pino e a superfície da rocha, garantindo-se assim o valor de 0,8 mm para a espessura do provete.

Após a colagem, o provete assim obtido, permanece em repouso durante 30 min.

Por forma a avaliar o efeito da água na ligação betume/agregado, ou mástique/agregado, foram realizados ensaios para duas condições de conservação dos provetes:

- ao ar durante 24 h. Para esta condição os ensaios são referenciados por “D”;
- em água a 40 °C durante 24 h, seguido de 1 h à temperatura ambiente. Para estas condições de conservação os ensaios foram referenciados por “W”.

Para cada uma das condições adotadas foram realizados três ensaios, fazendo-se o registo das forças de rotura, ou seja, das forças máximas aplicada aos provetes durante

os ensaios, calculadas as tensões de rotura respetivas e respetivo valor médio, e identificados os tipos de rotura observados, de acordo com o representado na figura 6.98.



Figura 6.98 Identificação do tipo de rotura observado nos ensaios de tração direta

Na realização dos ensaios foram seleccionadas as seguintes amostras:

- rochas graníticas: RAFRG1; RAFRG3 e AFRG5;
- rochas calcárias: RAFRC1; RAFRC5 e RAFRC6;
- betumes: 35/50 e PMB 45/80-60;
- mástiques: 35/50 + 0,2 Chda; 35/50 + 0,2 Chca; 35/50 + 0,2 Cem; 35/50 + 0,2 FC1 e 35/50 + 0,2 do filer recuperado da rocha respetiva; PMB 45/80-60 + 0,2 Chda; PMB 45/80-60 + 0,2 FC1.

Os valores médios das tensões de rotura obtidas nos ensaios são apresentados nas tabelas 6.39 a 6.41. Nas figuras 6.99 a 6.104, para além das tensões de rotura, são referidos os diferentes tipos de rotura ocorridos.

Tabela 6.39 Tensão de rotura por tração (MPa) do betume 35/50 e mástiques respetivos (conservação ao ar)

Referência da rocha	Tipo de ligante e condições de conservação					
	35/50 (D)	35/50 + 0,2 Chda (D)	35/50 + 0,2 Chca (D)	35/50 + 0,2 Cem (D)	35/50 + 0,2 FC1 (D)	35/50 + 0,2 FR (D)
RAFRG1	2,10	4,24	3,12	2,85	3,78	2,32
RAFRG3	1,89	5,16	1,45	2,90	2,64	2,60
RAFRG5	1,97	5,45	1,52	3,17	2,71	2,77
RAFRC1	2,92	2,03	2,07	2,20	2,04	2,12
RAFRC5	3,03	4,63	3,24	3,39	3,50	4,31
RAFRC6	3,24	5,03	3,29	3,00	3,75	3,80

Tabela 6.40 Tensão de rotura por tração (MPa) do betume 35/50 e mástiques respetivos (conservação em água)

Referência da rocha	Tipo de ligante e condições de conservação					
	35/50 (W)	35/50 + 0,2 Chda (W)	35/50 + 0,2 Chca (W)	35/50 + 0,2 Cem (W)	35/50 + 0,2 FC1 (W)	35/50 + 0,2 FR (W)
RAFRG1	1,35	2,71	1,99	1,81	2,36	2,04
RAFRG5	1,27	2,82	1,41	2,09	1,75	1,63
RAFRC1	2,06	2,94	2,93	2,69	2,71	3,27
RAFRC5	2,59	4,32	3,51	3,70	3,11	4,60

Tabela 6.41 Tensão de rotura por tração (MPa) do betume PMB 45/80-60 e mástiques respetivos

Referência da rocha	Tipo de ligante e condições de conservação		
	PMB 45/80-60 (D)	PMB 45/80-60 + 0,2 Chda (D)	PMB 45/80-60 + 0,2 FC1 (D)
RAFRG1	3,04	4,03	3,05
RAFRG5	2,26	3,68	2,77
RAFRC1	2,70	2,80	3,08
RAFRC5	3,13	3,43	2,60
Referência da rocha	PMB 45/80-60 (W)	PMB 45/80-60 + 0,2 Chda (W)	PMB 45/80-60 + 0,2 FC1 (W)
RAFRG1	1,26	1,31	1,06
RAFRG5	1,21	1,42	1,15
RAFRC1	2,95	3,64	1,57
RAFRC5	2,58	3,44	1,65

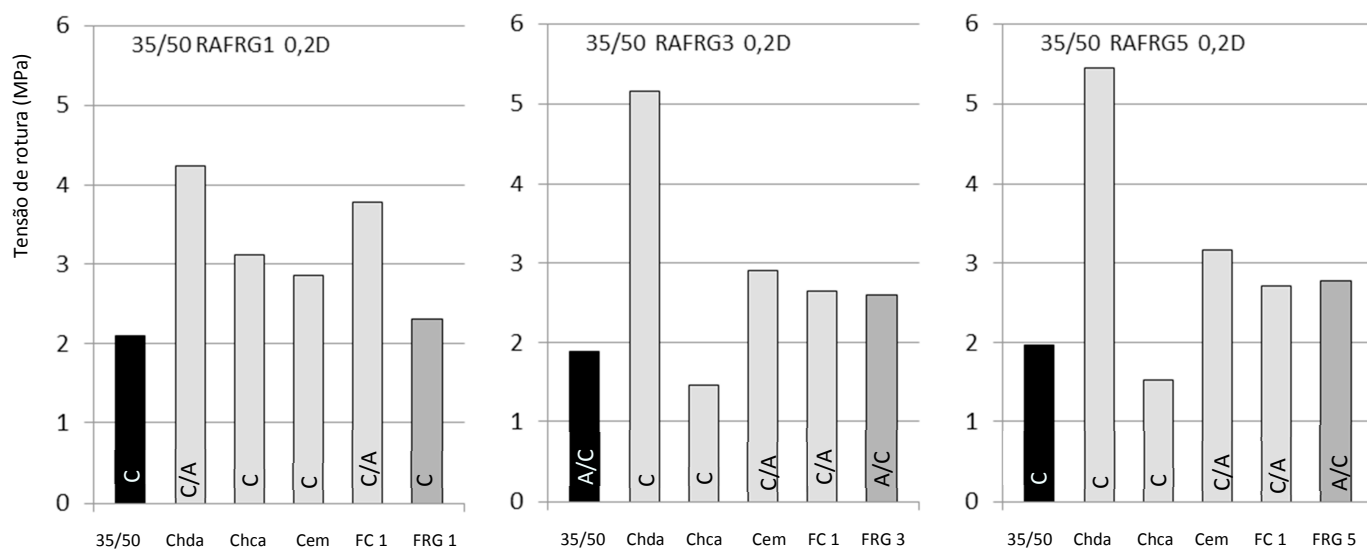


Figura 6.99 Resultados ensaios “pull-off”, RAFRG, betume 35/50 e respetivos mástiques (D)

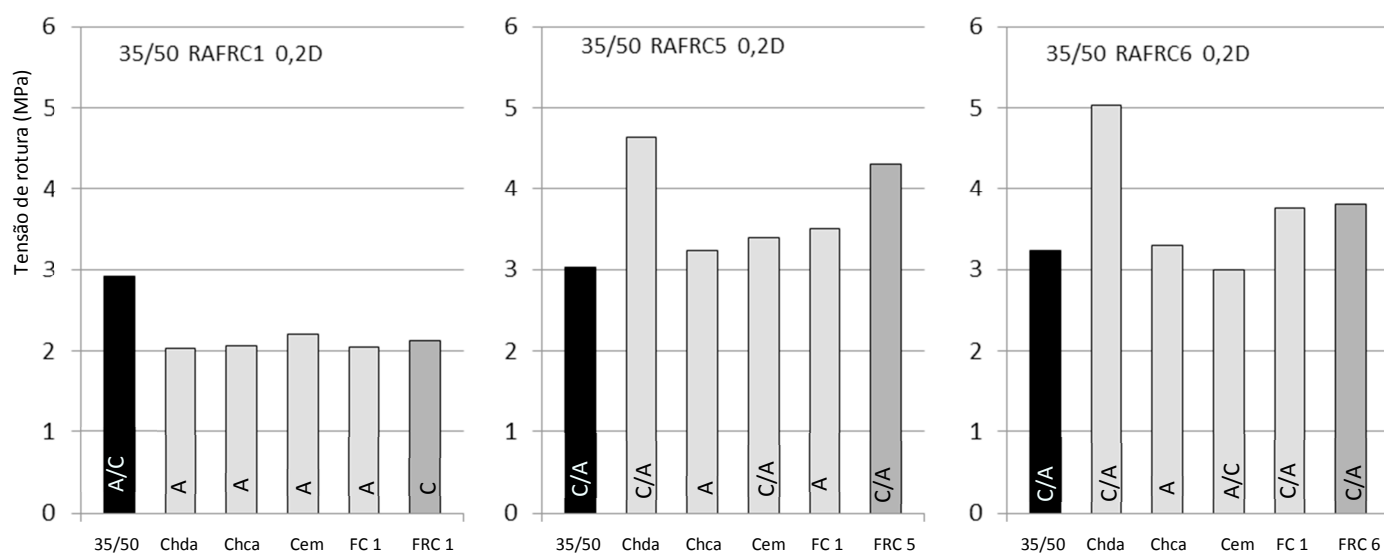


Figura 6.100 Resultados ensaios “pull-off”, RAFC, betume 35/50 e respetivos mástiques (D)

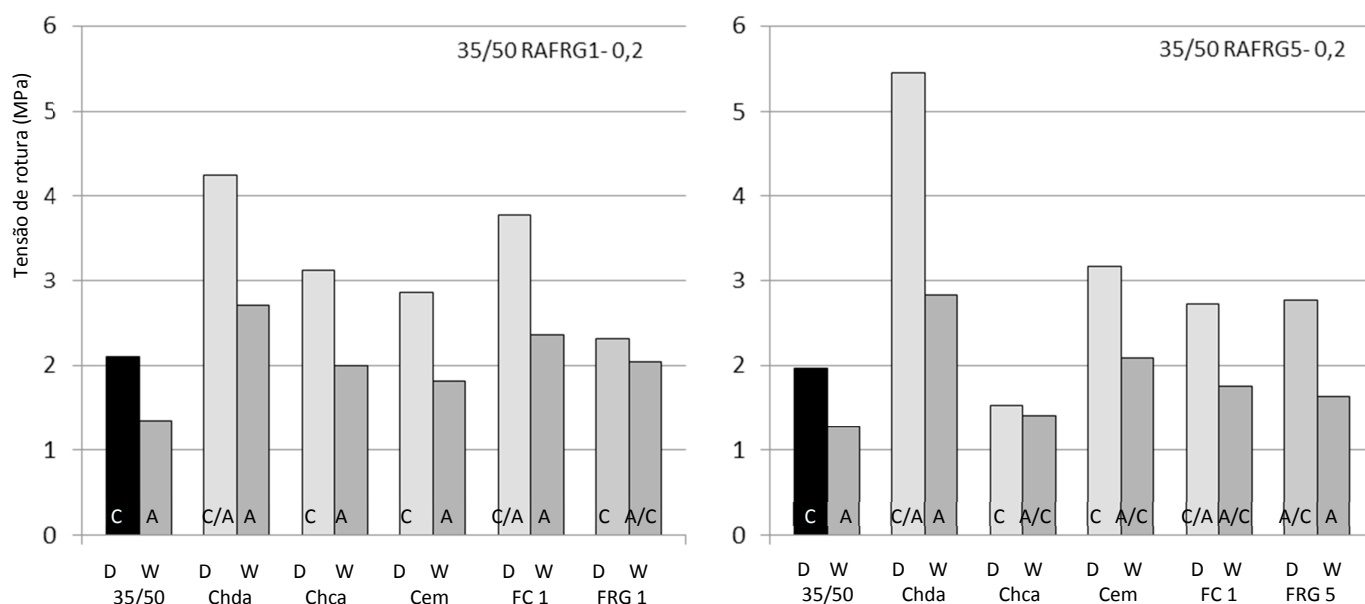


Figura 6.101 Resultados ensaios “pull-off”, RAFRG, betume 35/50 e respetivos mástiques (D) e (W)

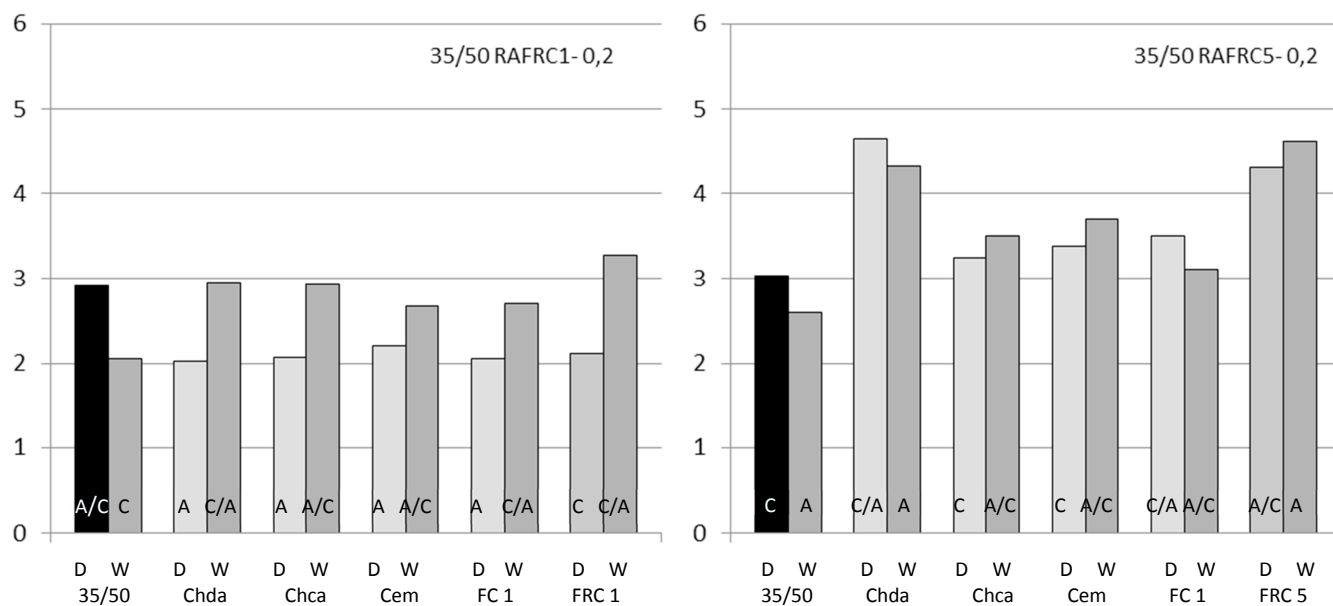


Figura 6.102 Resultados ensaios "pull-off", RAFC, betume 35/50 e respetivos mástiques (D) e (W)

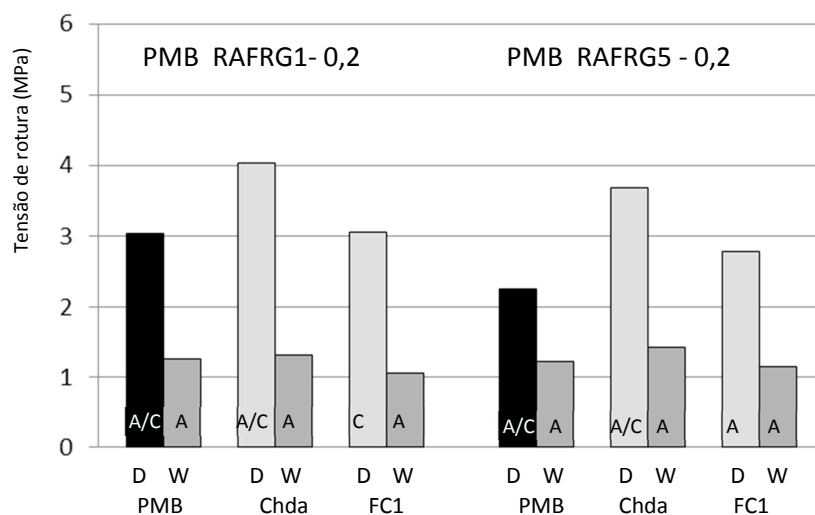


Figura 6.103 Resultados ensaios "pull-off", RAFC, PMB 45/80-60 e respetivos mástiques (D) e (W)

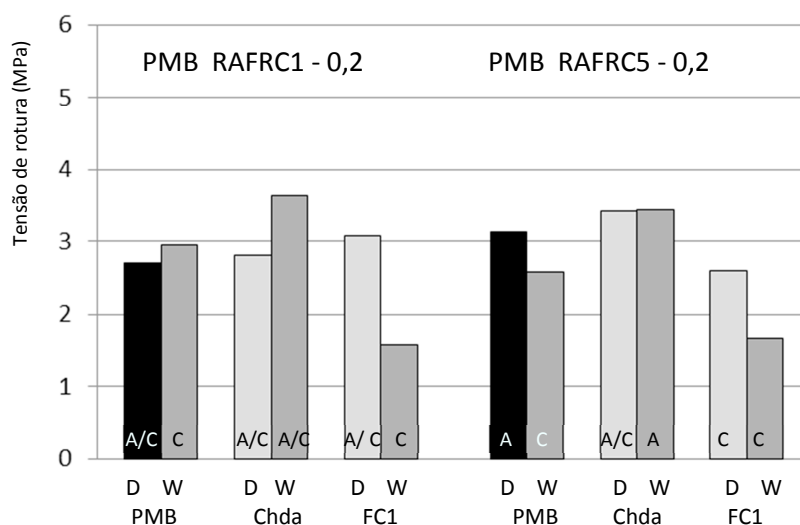


Figura 6.104 Resultados ensaios "pull-off", RAFC, PMB 45/80-60 e respetivos mástiques (D) e (W)

Os resultados observados nos ensaios permitem estabelecer as seguintes conclusões:

- o método de ensaio utilizado apresenta repetibilidade aceitável e permite distinguir a componente química da propriedade adesiva e coesiva dos materiais ensaiados, sendo possível através das forças de rotura obtidas, diferenciar comportamentos para todas as amostras ensaiadas. Esta mesma conclusão foi estabelecida por Moraes *et al.*, em 2010, com base numa campanha alargada de ensaios realizada pelos autores;
- no caso da utilização do betume 35/50 e das rochas graníticas, para as condições de ensaio adotadas e sem acondicionamento prévio em água, os mástiques com cal hidratada são os que apresentam maiores valores da tensão de rotura por tração, sendo a rotura quase exclusivamente coesiva. As tensões de rotura mais baixas são observadas para os mástiques com filer recuperado, no caso da rocha RAFRG1, e com cal hidráulica para as outras duas rochas, verificando-se roturas do tipo coesivas em todos estes casos. Este último aspeto permite ainda concluir que sem a presença da água, a componente química da adesão dos mástique aos agregados graníticos é muito importante, verificando-se que o mástique com cal hidratada apresenta as maiores forças coesivas;
- para as mesmas condições referidas no ponto anterior, mas no caso das rochas calcárias, observou-se, no caso da amostra RAFRC1 e para todos os mástiques utilizados, valores de tensão de rotura muito baixos e semelhantes, inferiores mesmo aos valores observados nos ensaios realizados apenas com o betume. Para esta rocha todas as roturas observadas foram do tipo adesivas, aspeto, que aliado aos baixos valores da tensões de rotura, permite concluir que esta rocha apresenta uma componente química da adesividade muito baixa. Para as restantes duas rochas o mástique com cal hidratada é o que apresenta valores da tensão de rotura mais elevados, com roturas do tipo coesivo/adesivo, e os que apresentam tensões de rotura mais baixos são os mástiques com cal hidráulica, para a a rocha RAFRC5, com rotura adesiva, e com o cimento, para a rocha RAFRC6, com rotura adesiva/coesiva;
- para todas as rochas graníticas, e nos casos em que foi utilizado o betume 35/50, os ensaios realizados após o período de imersão dos provetes em água observaram, relativamente aos valores dos ensaios sem acondicionamento prévio em água, um acentuado decréscimo das tensões de tração. Este aspeto foi igualmente identificado nos ensaios realizados, em 2010, por Canestrari *et al.*

Observa-se ainda que o tipo de rotura passa de, maioritariamente coesiva, para, quase exclusivamente adesiva. Fica assim demonstrada a influência da água na redução da componente química da adesão, no caso dos agregados graníticos;

- para as condições de ensaio adotadas, no caso da utilização do betume 35/50 com acondicionamento prévio em água e para as rochas graníticas, verifica-se que o mástique com cal hidratada é o que apresenta maior valor da tensão de rotura, observando-se que a rotura passa, de coesiva/adesiva, para adesiva. Os menores valores da tensão de rotura são observados para o mástique com cimento, no caso da rocha RAFRG1 com rotura adesiva, e para o mástique com a cal hidráulica, para a rocha RAFRG5 com rotura adesiva/coesiva;
- no caso da rocha calcária, com utilização do betume 35/50 e acondicionamento prévio em água, verifica-se que as variações dos resultados dos ensaios, para os diferentes mástiques, não são muito significativas. Os maiores valores da tensão de rotura são apresentados pelos mástiques com o filer recuperado, com roturas coesiva/adesiva para a rocha RAFRC1 e adesiva para a rocha RAFRC5. Os menores valores da tensão de rotura são apresentados pelo filer comercial calcário e para o cimento, com roturas maioritariamente do tipo adesiva/coesiva. Conclui-se ainda, que no caso da rocha calcária, e contrariamente ao observado na rocha granítica, a água não provoca uma significativa diminuição da adesividade, verificando-se mesmo, no caso da rocha RAFRC1, valores superiores aos registados nos provetes sem acondicionamento prévio em água;
- para os ensaios realizados com rocha granítica e com mástiques produzidos com o betume modificado PMB 45/80-60, verifica-se que a cal hidratada apresenta melhor desempenho do que o filer comercial calcário, tanto nos provetes curados ao ar, verificando-se neste caso roturas maioritariamente adesivas/coesivas, como nos provetes previamente imersos em água, sendo as roturas neste caso do tipo adesivas. Na utilização do betume modificado observa-se, igualmente, uma perda significativa da componente química da adesão, quando comparamos os provetes secos com os provetes previamente imersos. Fica assim evidenciado que os danos provocados pela água às misturas betuminosas fabricadas com agregados graníticos ocorrem, igualmente, quando são utilizados betumes modificados;
- já no caso da utilização de mástiques produzidos com o betume PMB 45/80-60 nos ensaios com as rochas calcárias observa-se, nos ensaios realizados, melhor desempenho da cal hidratada relativamente ao filer comercial calcário, exceto para

a rocha RAFRC1, sem acondicionamento prévio em água, caso em que os fileres apresentam desempenho semelhante. Salienta-se, no entanto, que para o betume modificado foram realizados ensaios em número insuficiente, de modo a poderem ser estabelecidas leis quanto ao desempenho dos diferentes fileres;

- comparando os resultados obtidos nos ensaios com os dois betumes verifica-se que, no caso dos agregados graníticos, os mástiques com o betume 35/50 apresentam melhor desempenho que os mástiques com o betume modificado, aspeto observado para as duas condições de conservação dos provetes. Nos ensaios com as rochas calcárias observam-se, para a amostra RAFRC5, resultados mais favoráveis para os mástiques com betume 35/50, enquanto que para a amostra AFRC5 foram quantificados maiores valores da tensão de rotura para os mástiques com o betume modificado, exceto no caso da utilização do filer comercial FC1 para a situação dos provetes previamente imersos em água.

6.2.3. Conclusões sobre os resultados dos ensaios dos betumes e mástiques betuminosos

Neste trabalho foram realizados um total de 554 ensaios laboratoriais, sobre amostras distintas de betumes e mástiques betuminosos, conforme descrito na tabela 6.42.

Tabela 6.42 Número de ensaios realizados aos betumes e mástiques betuminosos

Identificação do ensaio	Nº ensaios
Penetração	2
Temperatura anel e bola	56
Viscosidade em viscosímetro rotativo	180 (30 amostras; 6 patamares temperatura)
Envelhecimento RTFOT	2
Envelhecimento PAV (5 h)	2
Envelhecimento PAV (20 h)	4
Envelhecimento PAV (5+20 h)	32
Reómetro de corte (DSR)	192 (16 amostras 12 patamares temperatura)
"Pull-off"	84 (252 provetes)

A análise aos resultados obtidos nos ensaios realizados aos fileres e aos mástiques betuminosos permite concluir não ser possível estabelecer qualquer tipo de correlação, entre as propriedades avaliadas para os fileres e o desempenho dos mástiques betuminosos.

Apenas a variação da temperatura anel e bola permite estabelecer regressões lineares positivas, com coeficientes de determinação aceitáveis, principalmente para os valores da viscosidade obtidos para as temperaturas mais elevadas, conforme pode ser comprovado pela análise às figuras 6.105 e 6.106 e tabela 6.43.

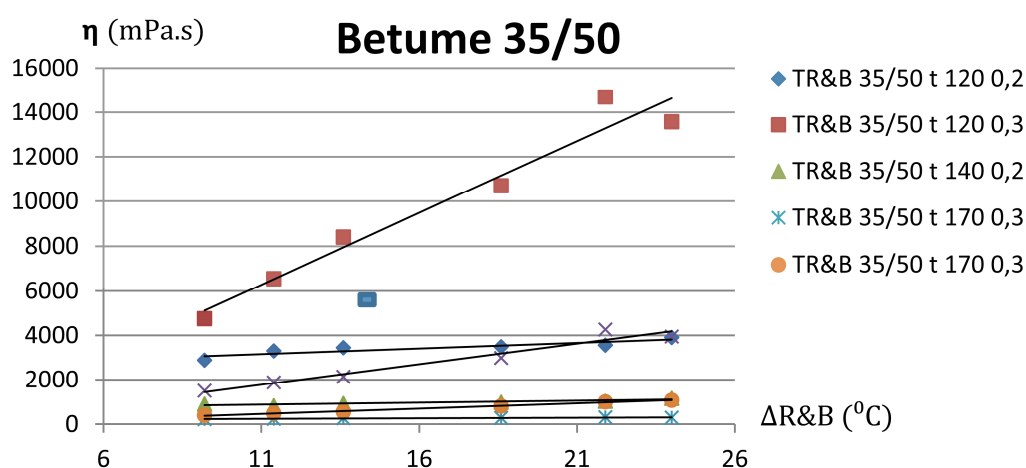


Figura 6.105 Relação entre os valores da variação da temperatura anel e bola dos fileres e a viscosidade dos mástiques com betume 35/50 para as temperaturas 120, 140 e 170 °C

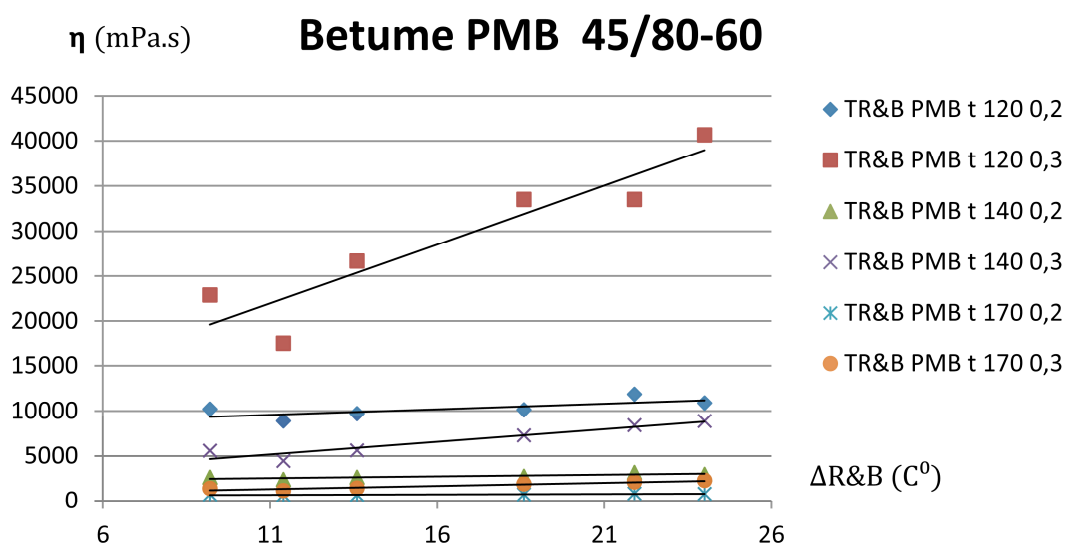


Figura 6.106 Relação entre os valores da variação da temperatura anel e bola dos fileres e a viscosidade dos mástiques com betume PMB 45/80-60 para as temperaturas de 120, 140 e 170 °C

Tabela 6.43 Valores do coeficiente de determinação para as regressões lineares entre a variação da temperatura anel e bola dos fileres e a viscosidade dos mástiques

Temperatura T (°C)	Betume 35/50		Betume PMB 45/80-60	
	Øv = 0,2	Øv = 0,3	Øv = 0,2	Øv = 0,3
120	0,82	0,95	0,53	0,86
140	0,83	0,95	0,71	0,89
170	0,87	1,00	0,78	0,92

No que diz respeito à contribuição do tipo de filer para o aumento da viscosidade do mástique betuminoso, é possível observar que os fileres que mais contribuem para esse aumento são a cal hidratada, a cal hidráulica e os fileres recuperados de granito. No caso da cal hidratada, esse aumento da viscosidade é muito elevado, verificando-se, em termos médios, ser necessário aumentar a temperatura em mais de 10 °C, para que este mástique apresente valores da viscosidade próximos dos dos restantes mástiques betuminosos.

Por outro lado, o cimento e os fileres de calcário, tanto os comerciais como o recuperado, são os que contribuem menos para o aumento da viscosidade do mástique sendo pois de prever, que para uma mesma temperatura de fabrico da mistura betuminosa, se obtenha maior trabalhabilidade da mistura com a utilização deste tipo de filer.

Para as restantes propriedades ensaiadas, envelhecimento, rigidez, ângulo de fase e adesão, não foi possível estabelecer qualquer tipo de correlação, concluindo-se assim, que a quantificação destas propriedades não pode ser realizada através dos resultados dos ensaios dos fileres, obrigando sim à realização dos respetivos ensaios laboratoriais aos mástiques betuminosos.

6.3. Ensaio em misturas betuminosas

6.3.1. Introdução

Por forma a avaliar o desempenho dos diferentes fileres nas misturas betuminosas foram realizados ensaios laboratoriais, para diferentes tipos de misturas betuminosas, sempre com recurso a procedimentos de ensaio definidos na normalização europeia. Para a realização dos ensaios foram selecionadas cinco misturas betuminosas distintas, de acordo com:

- três misturas do tipo betão betuminoso, AC 14 surf 35/50, duas delas utilizando agregados graníticos de diferentes origens, e uma terceira mistura betuminosa, em que foram utilizados agregados calcários. Para estas três misturas betuminosas foram realizados ensaios de sensibilidade à água, determinação da rigidez, comportamento à fadiga e às deformações permanentes;
- duas misturas abertas, do tipo PA 12,5, utilizando numa delas o betume de pavimentação 35/50, e na outra o betume modificado PMB 45/80-60. Para estas duas misturas foram realizados ensaios Cantabro, avaliando a perda de massa dos provetes para dois tipos de conservação prévia dos provetes: ao ar, e em água a uma temperatura de 60 °C. Ao agregado 0/6 utilizado nestas misturas foi eliminada, por peneiração, a fração 0/0,125 mm, sendo esta fração substituída, por igual percentagem, por filer empregue na mistura betuminosa.

As referências das misturas betuminosas e os ensaios realizados encontram-se definidos na tabela 6.44. Na tabela 6.45 e na figura 6.107 são apresentadas as formulações das misturas betuminosas e as distribuições granulométricas das misturas de agregados.

Tabela 6.44 Tipos e designações das misturas betuminosas ensaiadas

Referência das misturas betuminosas	Designação das misturas betuminosas	Ensaio realizado
M1	AC 14 surf 35/50 AFRG 5	Sensibilidade à água, rigidez, fadiga e deformações permanentes
M2	AC 14 surf 35/50 AFRG 1	Sensibilidade à água, rigidez, fadiga e deformações permanentes
M3	AC 14 surf 35/50 AFRC 1	Sensibilidade à água
M4	PA 12,5 35/50 AFRG 5	Cantabro
M5	PA 12,5 PMB 45/80-60 AFRG 5	Cantabro

Tabela 6.45 Formulação das misturas betuminosas ensaiadas

Constituintes das misturas betuminosas	Referências das misturas betuminosas				
	M1	M2	M3	M4	M5
Agregado 10/14 AFRG 5	25,4	---	---	38,3	38,3
Agregado 6/10 AFRG 5	27,6	---	---	43,0	43,0
Agregado 0/6 AFRG 5	39,5	---	---	---	---
Agregado 0/6 AFRG 5 com eliminação fração 0/0,125	---	---	---	11,1	11,1
Agregado 8/14 AFRG 1	---	38,2	---	---	---
Agregado 4/8 AFRG 1	---	9,5	---	---	---
Agregado 0/4 AFRG 1	---	44,9	---	---	---
Agregado 12/20 AFRC 1	---	---	15,0	---	---
Agregado 4/12 AFRC 1	---	---	41,7	---	---
Agregado 0/4 AFRC 1	---	---	35,9	---	---
Filer	2,5	2,5	2,5	3,3	3,3
Betume 35/50	5,0	4,9	4,9	4,3	---
PMB 45/80-60	---	---	---	---	4,3

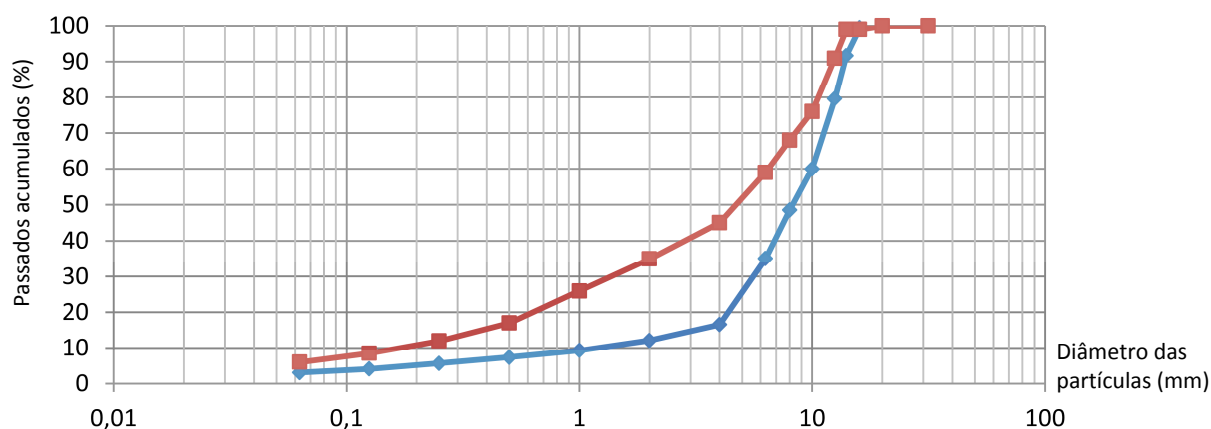


Figura 6.107 Distribuição granulométrica das misturas de agregados utilizadas nas misturas betuminosas AC 14 (vermelho) e nas misturas PA 12,5 (azul)

As principais propriedades dos agregados utilizados nas misturas betuminosas são apresentadas na tabela 6.46.

Tabela 6.46 Propriedades dos agregados utilizados nas misturas betuminosas ensaiadas

Referência do agregado	Propriedade							
	FI	SI	LA	M _{DE}	MV (Mg/m ³)	A água (%)	SE	MB (g/kg)
8/14 AFRG 1	6	12	23	8	2,62	0,5	---	---
4/8 AFRG 1	7	14	28	11	2,61	0,5	---	---
0/4 AFRG 1	---	---	---	---	2,62	0,4	60	1,0
10/14 AFRG 5	3	10	29	9	2,64	0,6	--	--
6/10 AFRG 5	5	13	34	13	2,66	0,6	--	--
0/6 AFRG 5	--	--	--	--	2,64	0,3	58	1,2
12/20 AFRC 1	13	15	34	12	2,65	0,2	---	---
4/12 AFRC 1	14	16	36	14	2,65	0,3	---	---
0/4 AFRC 1	---	---	---	---	2,66	0,2	59	1,1

6.3.2. Ensaio Cantabro

Os provetes para os ensaios Cantabro foram moldados em compactador de impacto, segundo a norma europeia EN 12697-30 (CEN, 2012), para uma energia de compactação correspondente a 50 pancadas por face.

No fabrico das misturas betuminosas foram utilizados os betumes 35/50 e PMB 45/80-60. Quanto aos agregados foram utilizados três produtos graníticos AFRG5, designados por 10/14, 6/10 e 0/6. Conforme já referido o agregado 0/6 foi previamente peneirado, por forma a eliminar a fração 0/0,125, e o material passado foi substituído pelo filer utilizado na mistura betuminosa. Como fileres foram utilizados a cal hidratada, a cal hidráulica, o filer comercial calcário FC1 e o filer recuperado, bem como três misturas de fileres, obtidas substituindo metade do filer recuperado por cal hidratada, cal hidráulica e filer comercial calcário.

Para a realização dos ensaios Cantabro seguiu-se o definido na norma europeia EN 12697-11 (CEN, 2012) e na norma espanhola NLT-362 (CEDEX, 1992), no entanto com ligeiras alterações, referidas e justificadas de seguida.

Os ensaios foram realizados para dois acondicionamentos distintos:

- em estufa a 25 °C durante 24 h. Para esta condição foram ensaiados 2 provetes e não 4 como referido na normalização espanhola, por se considerar não ser necessário, tendo em conta a pequena dispersão de resultados observada nos provetes para este tipo de acondicionamento. Os provetes para estas condições são referenciados pela letra D;

- em água a 60 °C durante 24 h, seguido de novo período de 24 h em estufa ventilada a 25 °C. Nestas condições foram ensaiados 4 provetes, cumprindo assim o procedimento normalizado, sendo os provetes referenciados pela letra W.

Na figura 6.108 são apresentadas fotografias dos provetes após realização do ensaio Cantabro, correspondentes à mistura betuminosa M5, utilizando como filer a cal hidratada. Os resultados dos ensaios, em termos de valores médios, são apresentados na tabela 6.47 e nas figuras 6.109 e 6.110.

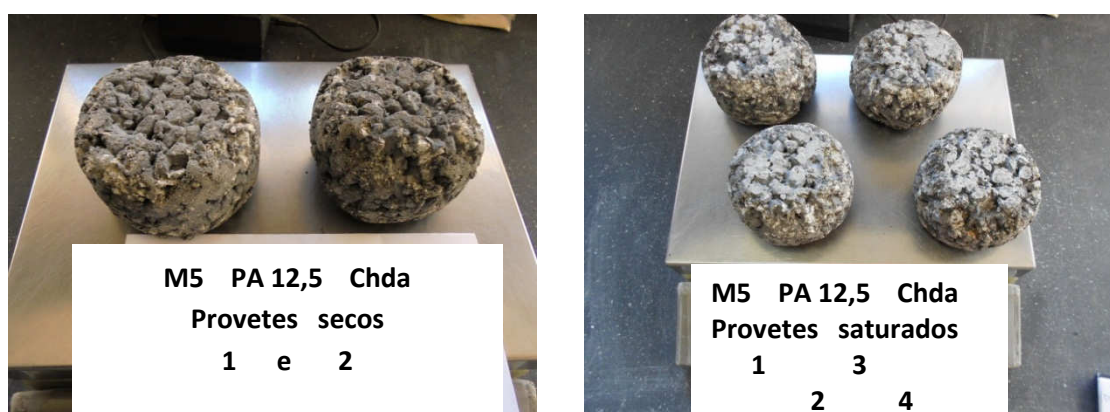


Figura 6.108 Provetes da mistura M5 com filer Chda após o ensaio Cantabro

Tabela 6.47 Resultados dos ensaios Cantabro

Referências das misturas betuminosas	Desgaste dos provetes secos D (%)	Desgaste dos provetes saturados W (%)
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com Chda	18,5	16,9
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com Chca	16,9	22,8
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com FC 1	17,8	25,8
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5	21,1	25,9
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5 + Chda	21,4	23,8
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5 + Chca	14,9	24,0
M4 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5 + FC 1	16,9	29,2
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com Chda	14,3	16,3
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com Chca	13,3	14,3
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com FC 1	16,6	21,7
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5	12,2	27,2
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5 + Chda	12,7	19,2
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5 + Chca	11,4	20,3
M5 – PA 12,5 AFRG 5 com FRG 5 + FC 1	14,1	26,2

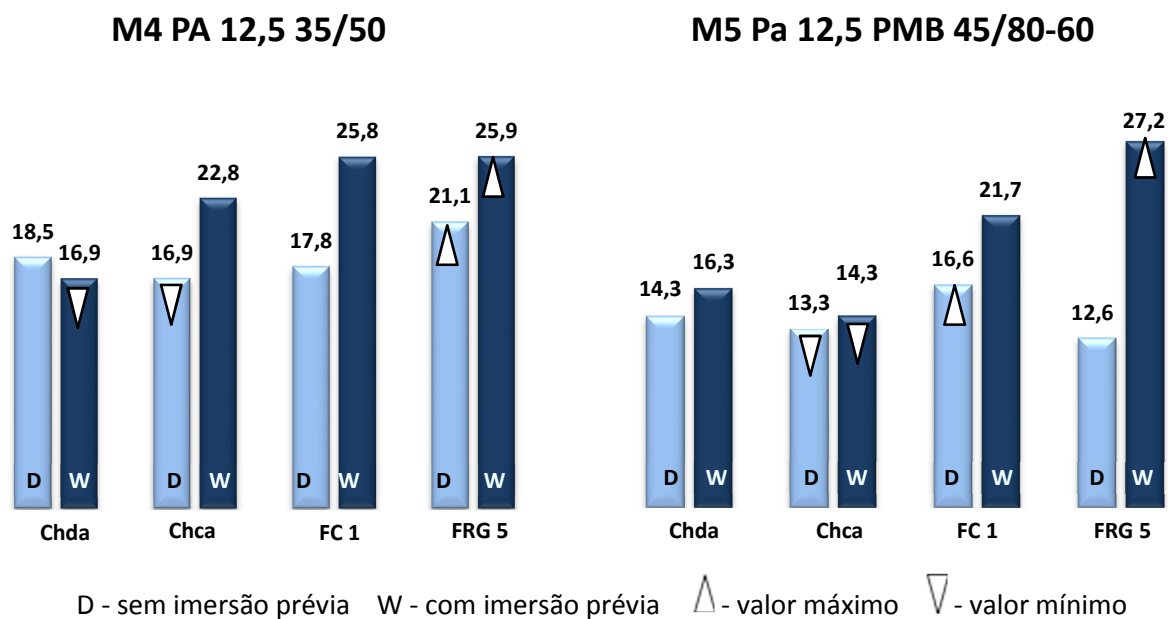


Figura 6.109 Resultados dos ensaios Cantabro para as misturas produzidas com um único filer

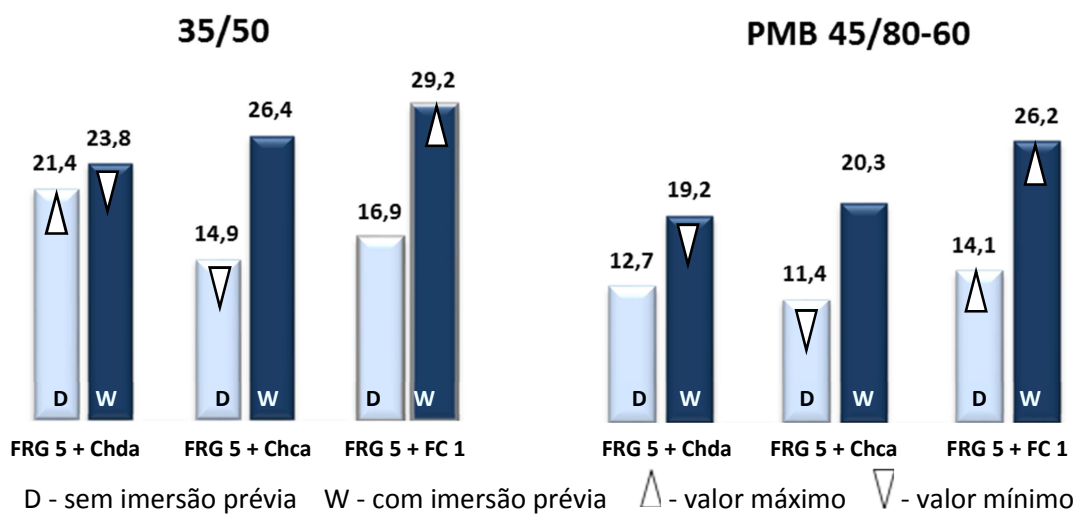


Figura 6.110 Resultados dos ensaios Cantabro para misturas produzidas com misturas de fileres

Os resultados dos ensaios permitem concluir que:

- a mistura betuminosa que apresenta melhor desempenho, tanto nos provetes acondicionados ao ar, como nos provetes acondicionados em água, foi a produzida com betume PMB 45/80-60 e com o uso da cal hidratada como filer;
- as misturas betuminosas com utilização do betume modificado e da cal hidratada ou da cal hidráulica apresentam comportamento semelhantes. Já nas misturas

betuminosas em que foi empregue o betume puro, a cal hidratada apresenta melhor desempenho, para os provetes acondicionados em água, e a cal hidráulica, para os provetes acondicionados ao ar;

- a mistura produzida com cal hidratada e betume 35/50 apresenta resultados que cumprem com os valores definidos como limite de aceitação nos cadernos de encargos do I.P., S. A. e da BRISA – Auto-estradas de Portugal, S. A.;
- nos ensaios realizados com misturas betuminosas em que os fileres comerciais foram parcialmente substituídos pelo filer recuperado, observa-se, de uma forma geral, uma diminuição no desempenho das misturas betuminosas;
- os resultados obtidos permitem concluir que os fileres mais adequados para a utilização em misturas betuminosas do tipo drenante são a cal hidráulica e a cal hidratada, e que é possível obter, com o betume puro 35/50, misturas betuminosas drenantes com desempenho adequado à utilização em camada de desgaste dos pavimentos das estradas portuguesas.

6.3.3 Ensaio de sensibilidade à água

Os provetes para a realização dos ensaios de sensibilidade à água foram moldados segundo a norma EN 12697-30 (CEN, 2012), com recurso a um compactador de impacto, para uma energia de compactação correspondente a 30 pancadas por face. Procurou-se, assim, aumentar a porosidade das misturas betuminosas, de modo a que o efeito da água se fizesse sentir de forma mais evidente, e que este aspeto pudesse vir refletido nos resultados dos ensaios. Para esta energia de compactação obtiveram-se valores da porosidade das misturas betuminosas entre 8 a 10%. Por forma a minimizar as dispersões nos resultados, devidas à preparação dos provetes, e atendendo às conclusões constantes num estudo, onde foi avaliada a reprodutibilidade dos resultados obtidos em ensaios segundo esta metodologia, Estradas de Portugal, 2009, colocou-se o maior cuidado na moldagem dos provetes, mantendo rigorosamente as mesmas condições para todas as misturas.

Para estes ensaios foram produzidas três misturas betuminosas do tipo AC 14 surf 35/50, utilizando, em duas delas, agregados graníticos de duas origens distintas, AFRG1 e AFRG5, sendo utilizados, na terceira mistura, agregados de origem calcária AFRC1. Os fileres utilizados foram, para além dos recuperados em central, a cal hidratada, a cal hidráulica e o filer comercial calcário. Estas misturas betuminosas foram

utilizadas não só nos ensaios de sensibilidade à água, mas também nos ensaios de rigidez, deformações permanentes e fadiga.

Os ensaios foram realizados de acordo com o descrito na norma EN 12697-12 (CEN, 2008) e os resultados obtidos encontram-se indicados na tabela 6.48 e nas figuras 6.111 e 6.112.

Tabela 6.48 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água

Referências das misturas betuminosas	Baridade ρ_{bssd} (Mg/m ³)	Força rotura provetes secos ITS _d (kPa)	Força rotura provetes saturados ITS _w (kPa)	Resistência conservada em tração indireta ITSR (kPa)
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com Chda	2,281	2865	2509	87,6
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com Chca	2,309	3304	2852	86,3
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com FC1	2,261	2474	1930	78,0
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com FRG5	2,263	2616	1993	76,2
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com Chda + FRG5	2,312	3115	2505	80,4
M2 - AC 14 surf 35/50 AFRG1 com Chda	2,315	3579	2960	82,7
M2 - AC 14 surf 35/50 AFRG1 com Chca	2,306	3025	2299	76,0
M3 - AC 14 surf 35/50 AFRC1 com Chda	2,437	3720	3307	88,9
M3 - AC 14 surf 35/50 AFRC1 com Chca	2,433	3485	3292	94,5
M3 - AC 14 surf 35/50 AFRC1 com FC 1	2,435	3382	2927	86,5
M3 - AC 14 surf 35/50 AFRC1 com FRC 1	2,430	3493	3033	86,8

**M1 AC 14 35/50 AFRG 5 e
M2 AC 14 35/50 AFRG 1**

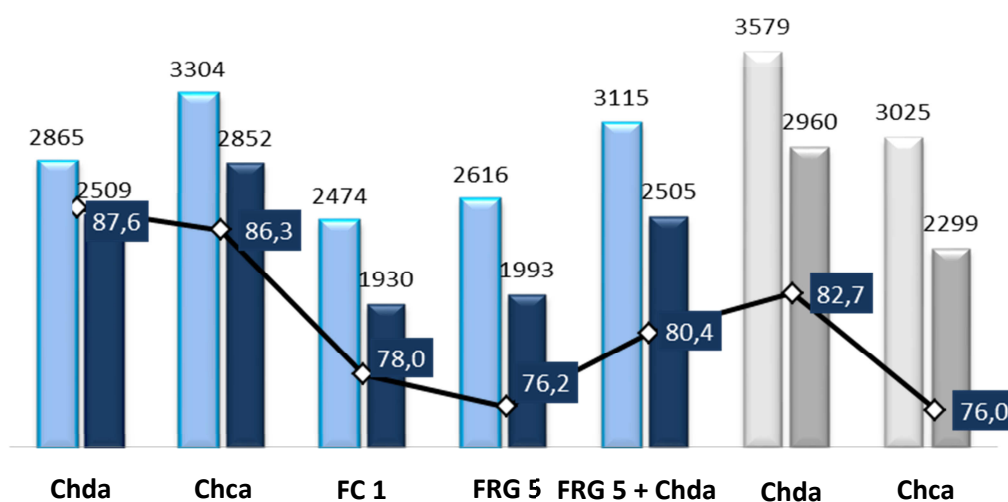


Figura 6.111 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para misturas produzidas com agregados graníticos

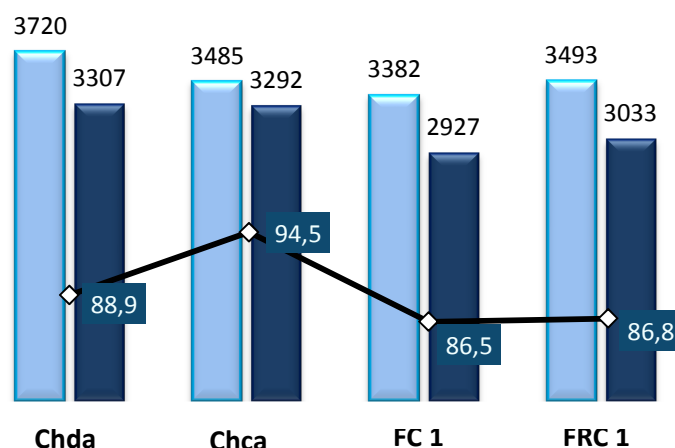
M3 AC 14 35/50 AFRC 1

Figura 6.112 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para misturas produzidas com agregados calcários

Os resultados obtidos permitem desde já concluir:

- a metodologia de ensaio, definida na norma europeia, permite obter resultados bem diferenciados, função dos materiais utilizados nas misturas betuminosas, sendo pois adequada, na previsão da sensibilidade à água das misturas betuminosas. Esta conclusão foi igualmente estabelecida por Behiry em 2012;
- para os agregados graníticos AFRG1 e para os agregados calcários AFRC1, a mistura betuminosa com cal hidratada é a que apresenta maiores valores da força de rotura. Para a mistura com agregados AFRG5, os maiores valores da força de rotura são atingidos para a mistura betuminosa com cal hidráulica;
- os valores de ITSR são máximos no caso das misturas com agregados graníticos, quando é utilizada a cal hidratada, enquanto que, quando o agregado utilizado é de origem calcária, é para as misturas com cal hidráulica, que se obtêm os mais elevados resultados nos ensaios realizados;
- apesar da elevada porosidade dos provetes, todos os valores observados de ITSR são superiores a 75%, significando pois que todas as misturas cumprem com o valor mínimo fixado no caderno de encargos da I.P.,S.A..

6.3.4 Ensaio de comportamento às deformações permanentes

Nos ensaios de deformações permanentes foram utilizadas as mesmas formulações das misturas betuminosas utilizadas nos ensaios de sensibilidade à água, sendo os provetes obtidos por serragem de placas moldadas com cilindro compactador (figura 6.113). A

energia de compactação foi adotada, procurando que as misturas apresentassem uma porosidade próxima do valor obtido na formulação laboratorial da mistura betuminosa, ou seja, 4%.

Os ensaios de avaliação do desempenho das misturas betuminosas, em termos de deformações permanentes, foram realizados ao ar, a uma temperatura de 60 °C, em equipamento pequeno, segundo o método descrito no anexo B da norma europeia EN 12697-22 (CEN, 2003). Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.49 e nas figuras 6.114 a 6.116.



Figura 6.113 Preparação de placas de mistura betuminosa

Tabela 6.49 Valores obtidos nos ensaios de “Wheel tracking”

Referências das misturas betuminosas	Baridade ρ_{bssd} (Mg/m ³)		Profundidade RD _{AIR} (mm)		% Rodeira PRD _{AIR} (%)		Declive WTS _{AIR} (mm/10000)	
	Provete	Média	Provete	Média	Provete	Média	Provete	Média
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com Chda	2,336	2,349	2,98	3,30	5,5	6,20	0,06	0,065
	2,362		3,62		6,9		0,07	
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com Chca	2,336	2,338	3,79	3,72	6,8	6,55	0,12	0,115
	2,340		3,65		6,3		0,11	
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com FC1	2,293	2,313	4,15	3,74	7,6	6,85	0,12	0,105
	2,332		3,33		6,1		0,09	
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com FRG5	2,310	2,303	3,30	3,33	5,8	5,85	0,09	0,085
	2,295		3,35		5,9		0,08	
M1 - AC 14 surf 35/50 AFRG5 com Chda e FRG5	2,312	2,320	4,15	3,66	7,6	6,80	0,15	0,130
	2,328		3,17		6,0		0,11	
M2 - AC 14 surf 35/50 AFRG1 com Chda	2,367	2,357	3,47	3,63	6,5	6,90	0,07	0,080
	2,347		3,79		7,3		0,09	
M2 - AC 14 surf 35/50 AFRG1 com Chca	2,293	2,284	3,41	3,42	6,2	6,25	0,09	0,090
	2,275		3,42		6,3		0,09	

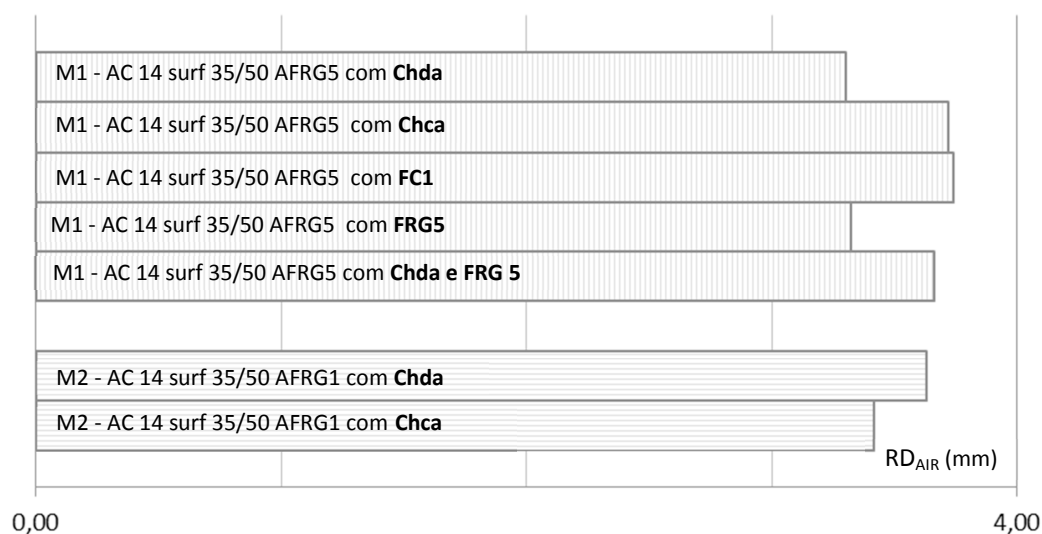


Figura 6.114 Representação gráfica da profundidade total de rodeira obtida nos ensaios de pista

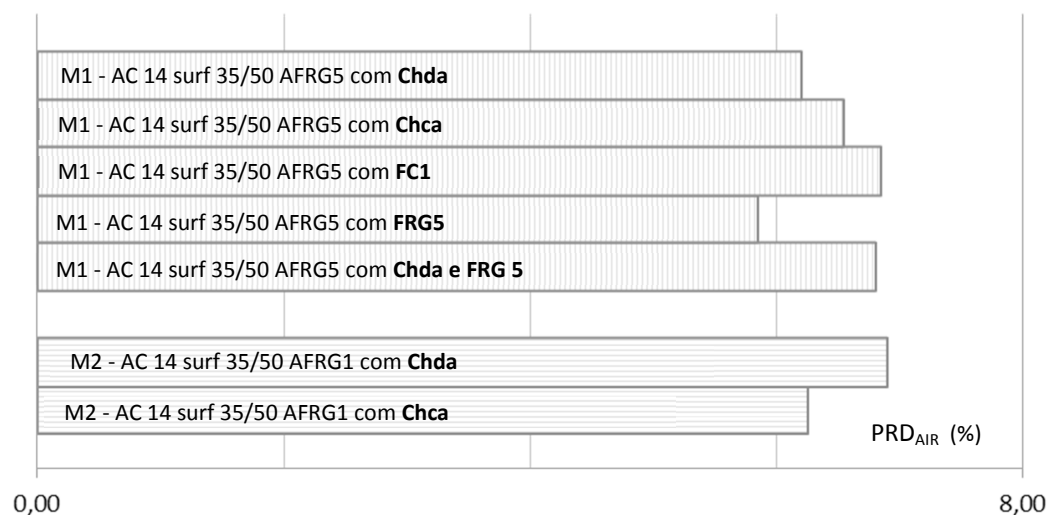


Figura 6.115 Representação gráfica da percentagem de rodeira obtida nos ensaios de pista

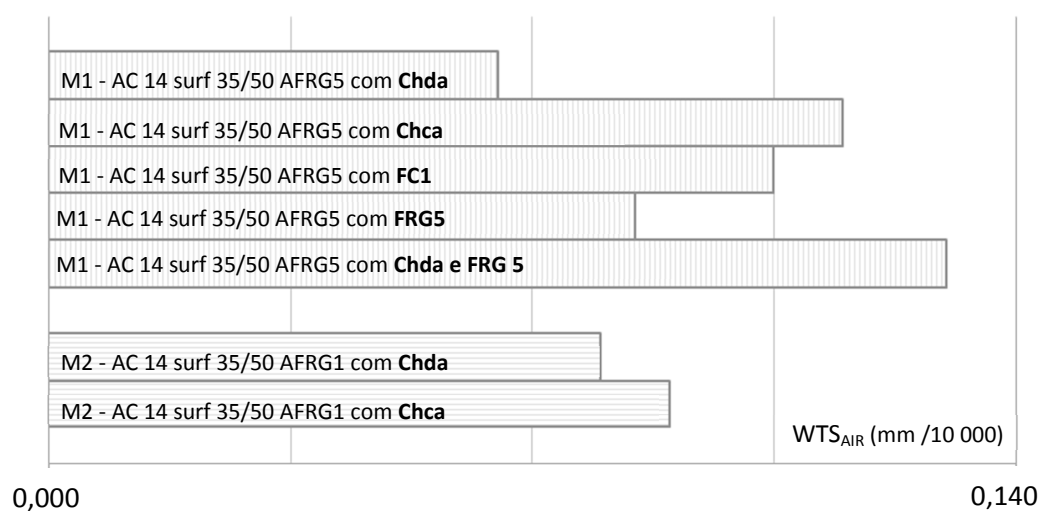


Figura 6.116 Representação gráfica do declive máximo da rodeira obtido nos ensaios de pista

A análise dos resultados obtidos permite estabelecer algumas conclusões:

- os valores da profundidade de rodeira, quer em percentagem, quer em valor absoluto, apresentam-se, para todas as misturas betuminosas ensaiadas, muito baixos e com pequena variação, não sendo por isso possível, estabelecer conclusões claras em termos do desempenho das diferentes misturas, observando-se no entanto, para a mistura M1, valores um pouco inferiores para as misturas betuminosas produzidas com a cal hidratada e com o filer recuperado;
- o declive máximo de rodeira apresenta valores significativamente inferiores no caso das misturas betuminosas produzidas com cal hidratada, relativamente às restantes misturas ensaiadas. Conclusão idêntica é referida no trabalho apresentado por Little & Petersen em 2011;
- a mistura betuminosa obtida com utilização da mistura do filer recuperado e da cal hidratada apresenta pior desempenho que as misturas betuminosas em que estes fileres foram utilizados de forma individualizada.

6.3.5 Ensaios de rigidez e de fadiga

Os ensaios para a quantificação da rigidez e para a determinação da lei de fadiga foram realizados em provetes prismáticos, de acordo com o anexo B da norma europeia EN 12697-26 (CEN, 2012).

Os ensaios de rigidez foram realizados para as frequências de 1, 5, 8 e 10 Hz, para extensão constante de 100 $\mu\epsilon$, para três patamares de temperatura: 10, 20 e 30 °C, sendo o resultado dos ensaios registados ao centésimo ciclo de carga.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.50, e através das isócronas da rigidez e do ângulo de fase, para as frequências de 1, 5 e 10 Hz, representadas nas figuras 6.117 a 6.124.

Para os ensaios de fadiga foi considerada apenas a temperatura de ensaio de 20 °C, tendo sido realizados ensaios a extensão constante, para os patamares de 190, 300 e 500 $\mu\epsilon$.

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga são apresentados nas leis de fadiga representadas nas figuras 6.125 a 6.131.

Tabela 6.50 Valores obtidos nos ensaios de rigidez das misturas betuminosas

Referência da mistura		M1 com Chda		M1 com Chca		M1 com FC 1		M1 com FRG 5		M1 com Chda e FRG5		M2 com Chda		M2 com Chca	
T (°C)	f (Hz)	E* (MPa)	Ø (°)	E* (MPa)	Ø (°)	E* (MPa)	Ø (°)	E* (MPa)	Ø (°)	E* (MPa)	Ø (°)	E* (MPa)	Ø (°)	E* (MPa)	Ø (°)
10	10	15588	8,0	13850	9,0	13965	9,8	11991	9,9	11290	10,0	15972	9,9	11544	10,3
	8	15209	10,0	13429	9,8	13202	9,9	11490	10,3	10557	10,0	15426	9,6	10906	10,4
	5	14053	9,5	12231	10,2	11702	10,6	10192	10,4	9688	11,1	14216	12,2	9800	9,8
	1	10616	17,6	9116	19,2	8706	18,7	7420	20,9	7088	21,6	10306	21,0	7247	20,6
20	10	8855	20,6	7894	21,2	7998	18,6	6115	19,8	7158	20,1	9674	20,8	7237	18,9
	8	8164	20,4	7128	21,4	7448	19,0	5766	22,8	6547	21,2	8906	20,3	6680	21,2
	5	6985	23,3	6097	24,1	6298	21,1	4946	25,0	5451	24,4	7537	20,1	5630	22,1
	1	4241	39,1	3556	39,7	3784	34,3	2979	36,5	3061	39,4	4462	39,8	3316	38,1
30	10	4000	34,4	2716	37,8	3052	36,6	2319	40,1	2622	36,4	4603	35,4	2855	35,4
	8	3619	36,0	2445	40,8	2792	39,1	2113	39,6	2378	36,5	4062	35,1	2501	36,8
	5	2948	44,4	2030	52,1	2227	47,3	1626	46,2	1876	46,6	3355	42,4	2061	45,9
	1	1279	51,2	839	48,2	1025	52,8	809	47,4	879	54,1	1495	48,6	988	40,9

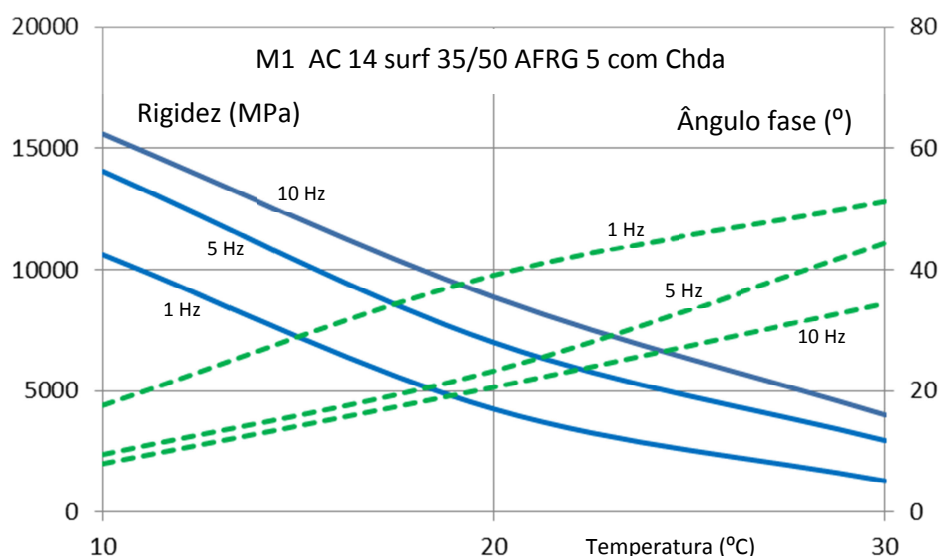


Figura 6.117 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com Chda

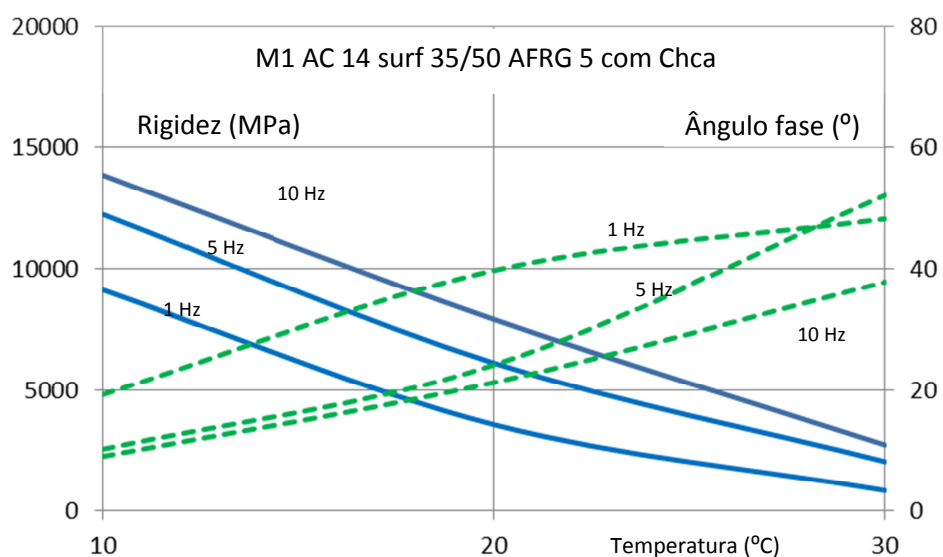


Figura 6.118 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com Chca

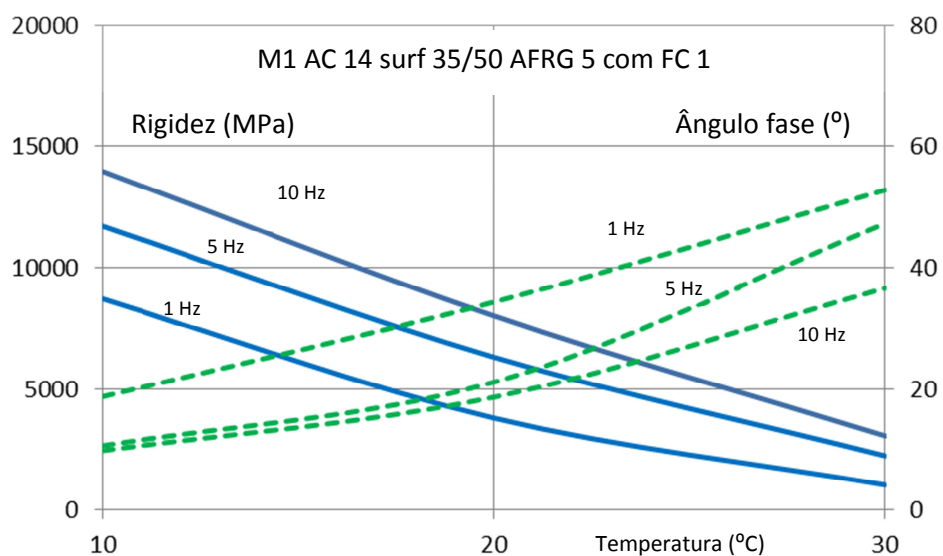


Figura 6.119 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com FC1

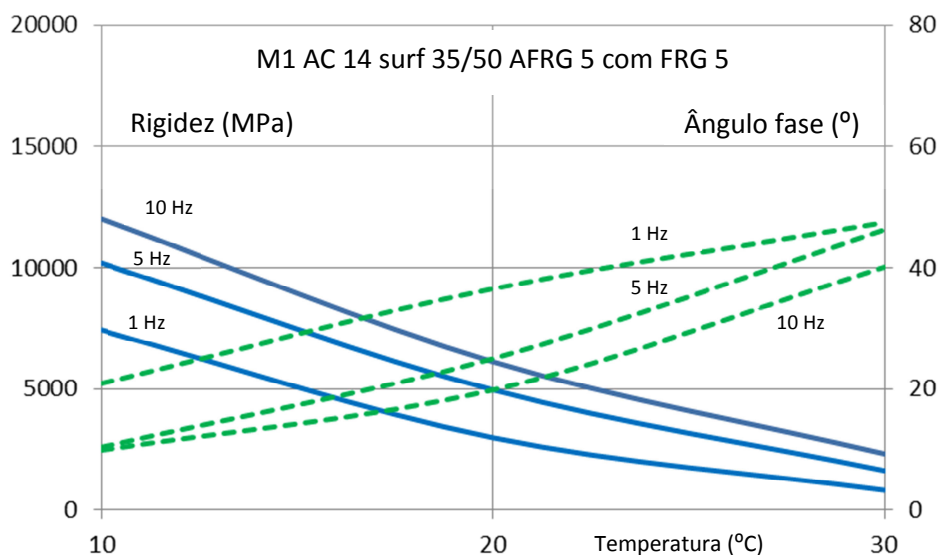


Figura 6.120 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com FRG5

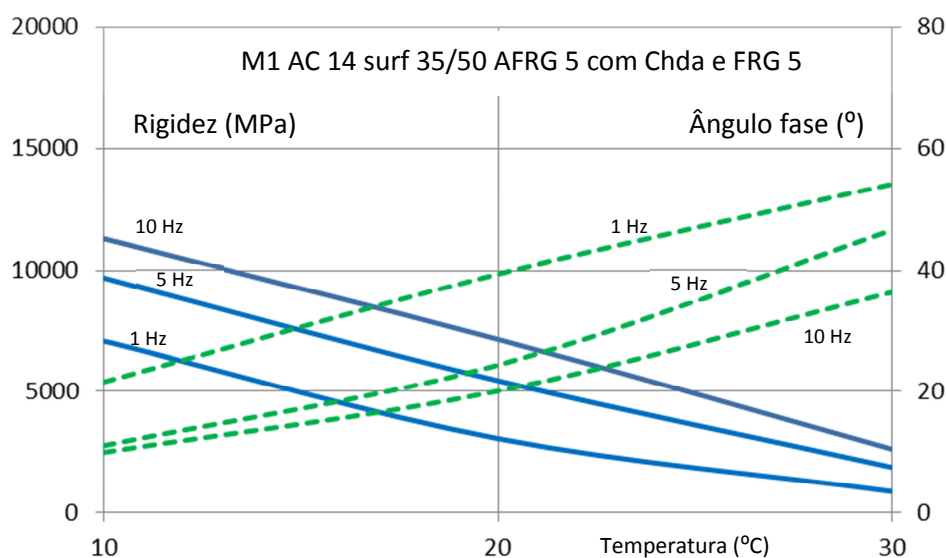


Figura 6.121 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M1 com Chda + FRG5

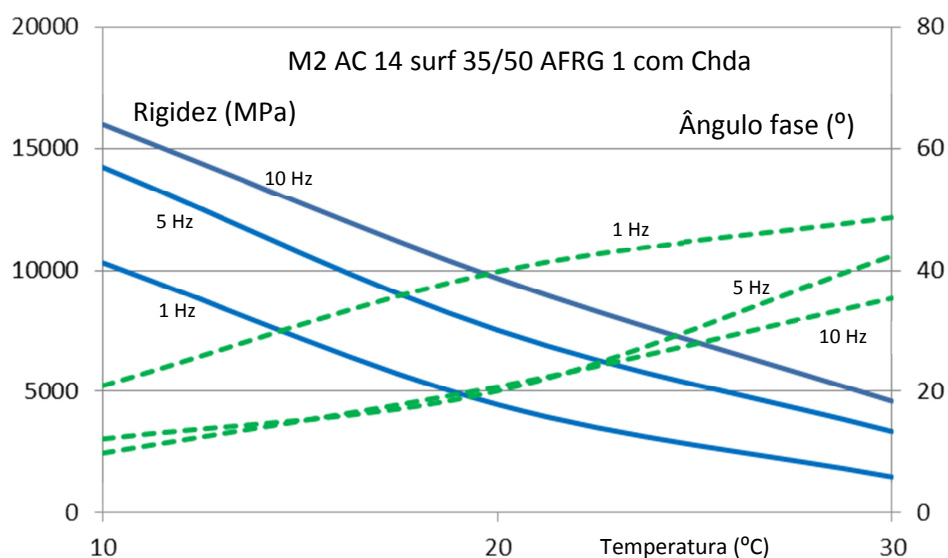


Figura 6.122 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M2 com Chda

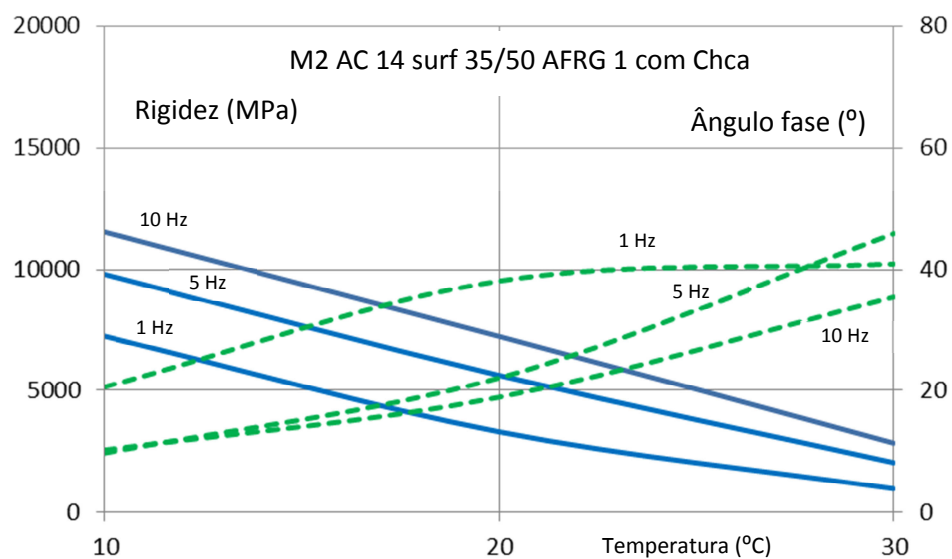


Figura 6.123 Isócronas da rigidez e ângulo de fase da mistura betuminosa M2 com Chca

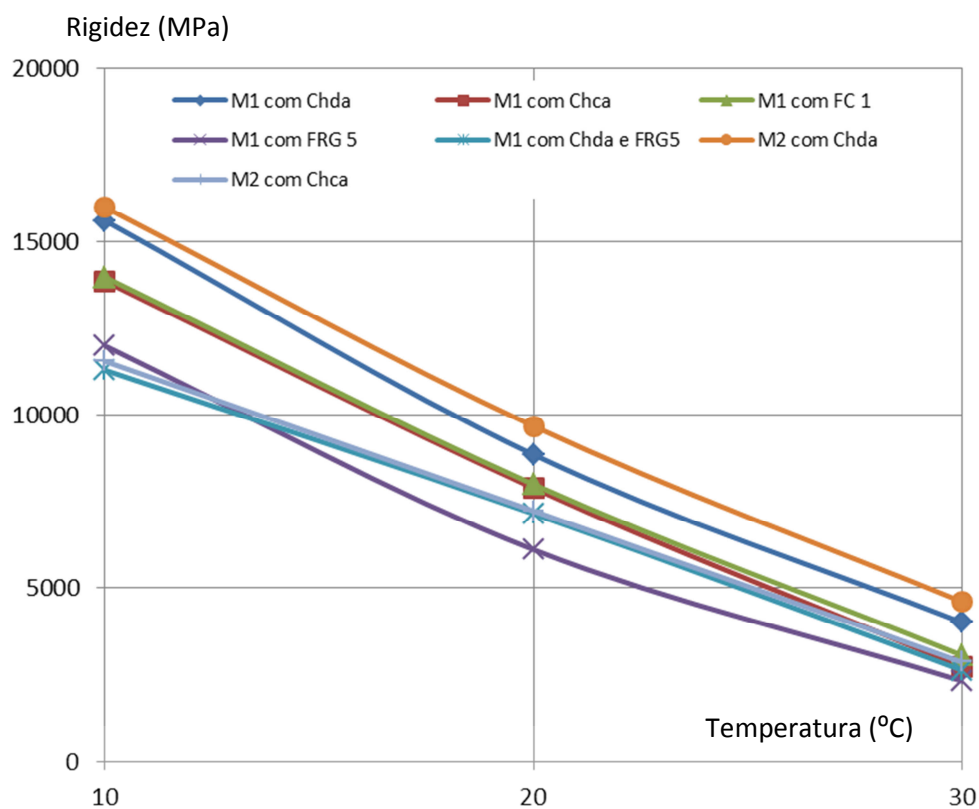


Figura 6.124 Isócronas da rigidez das misturas betuminosas ensaiadas para uma frequência de 10 Hz

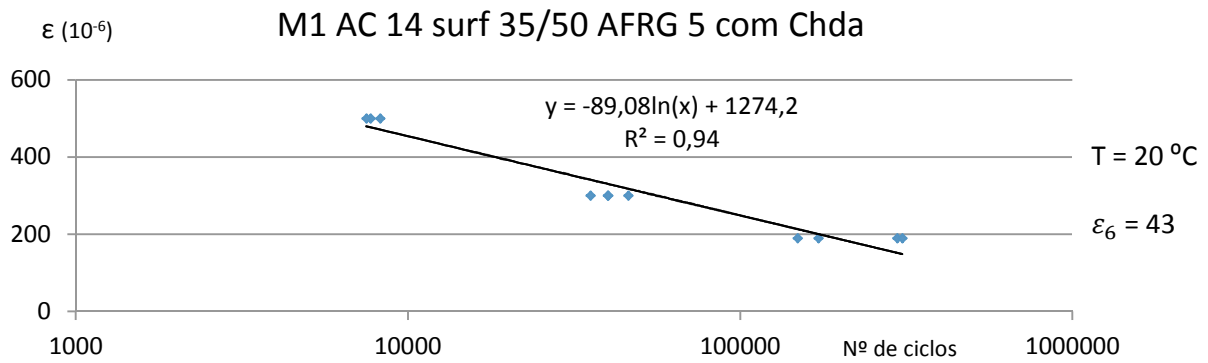


Figura 6.125 Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com Chda

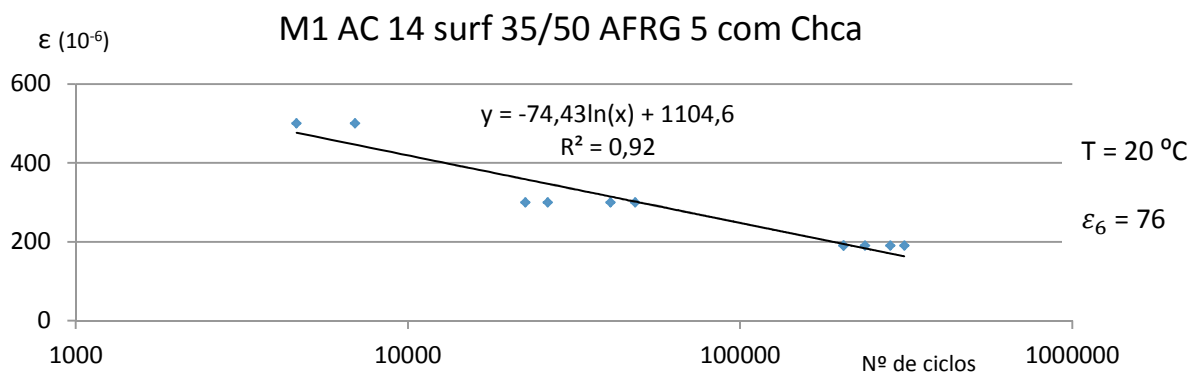


Figura 6.126 Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com Chca

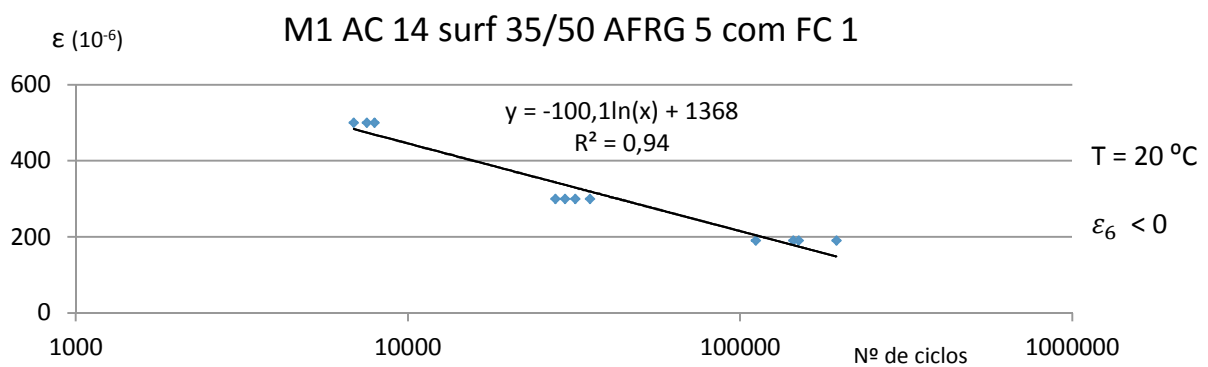


Figura 6.127 Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com FC1

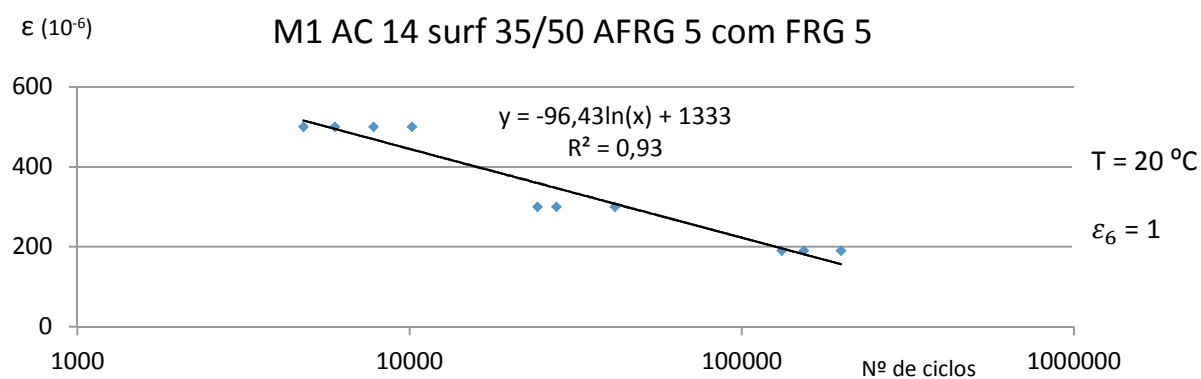


Figura 6.128 Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com FRG5

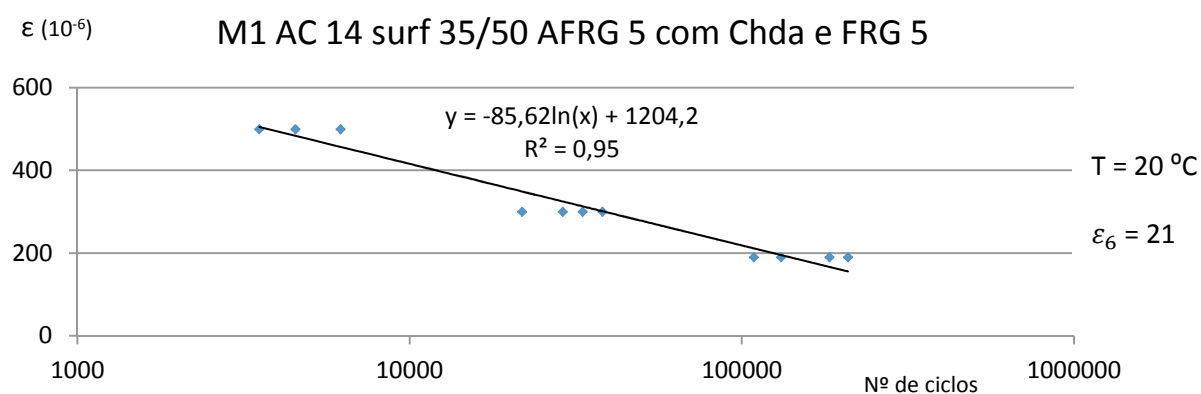


Figura 6.129 Lei de fadiga da mistura betuminosa M1 com Chda+FRG5

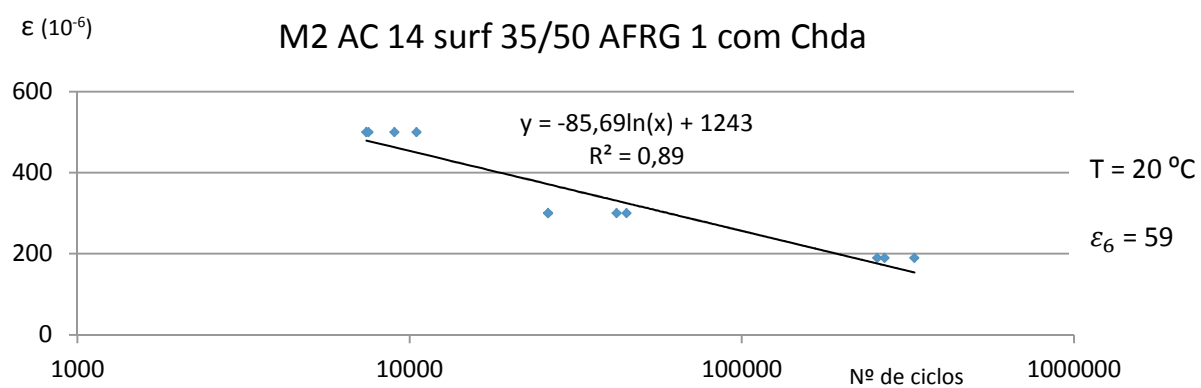


Figura 6.130 Lei de fadiga da mistura betuminosa M2 com Chda

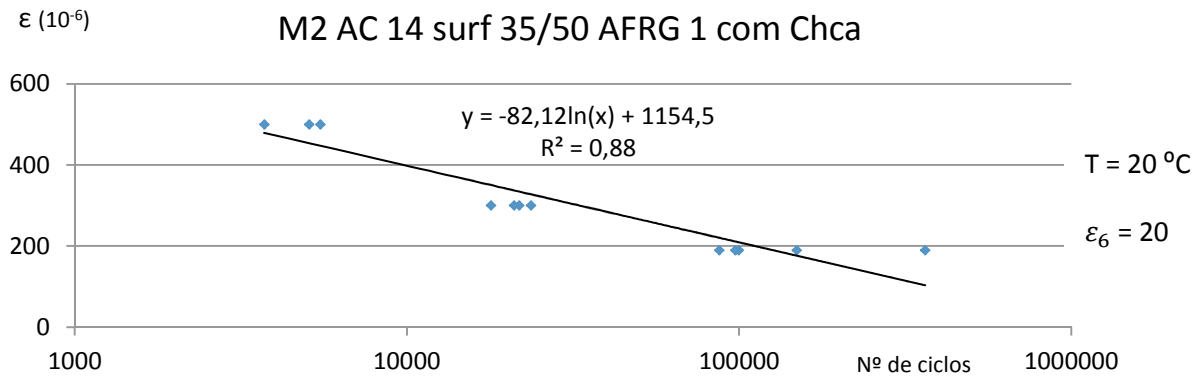


Figura 6.131 Lei de fadiga da mistura betuminosa M2 com Chca

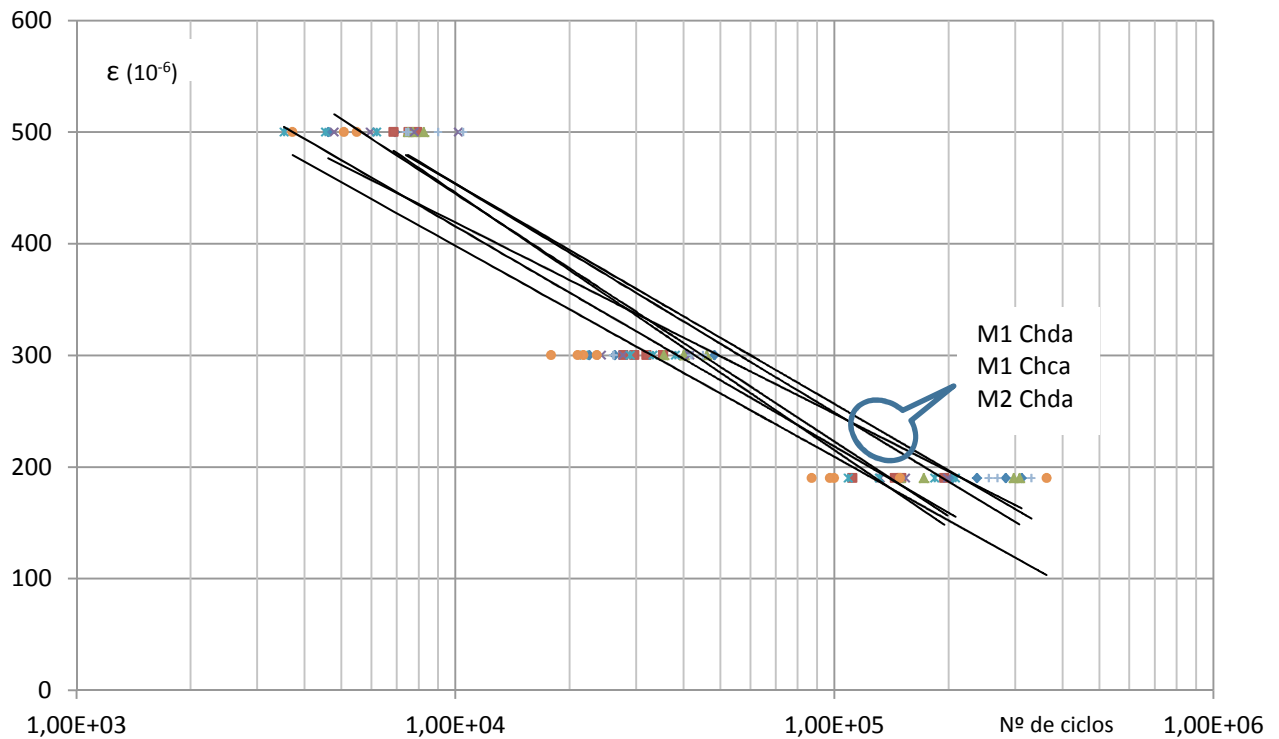


Figura 6.132 Lei de fadiga das misturas betuminosas ensaiadas

Os resultados obtidos nos ensaios de rigidez e de fadiga permitem definir as seguintes conclusões:

- os maiores valores de rigidez são observados para as misturas betuminosas produzidas com cal hidratada, observando-se este comportamento para todos os patamar de temperatura e valores da frequência de ensaio;
- a mistura betuminosa que apresenta menor rigidez, para os patamares de temperatura de 20 e 30 °C, é a que corresponde à utilização do filer recuperado

em central. Para a temperatura de 10 °C verifica-se que a mistura produzida com cal hidráulica, para um dos agregados graníticos utilizados, observa menor rigidez que as restantes misturas betuminosas;

- quanto aos valores do ângulo de fase não se observam diferenças significativas nas diferentes misturas betuminosas ensaiadas, registando-se valores um pouco superiores para a mistura produzida com filer recuperado de granito, e apenas para as frequências mais elevadas;
- quanto ao comportamento à fadiga, verifica-se que as misturas betuminosas que apresentam melhor desempenho, são as que utilizam como filer a cal hidratada e a cal hidráulica. Observam-se nestes casos, menor inclinação das retas de fadiga e maiores valores da extensão de tração para 10^6 de ciclos de carga. Os piores desempenhos são registados para as misturas que utilizaram o filer comercial calcário e o filer recuperado de granito.

6.3.6 Conclusões sobre os resultados dos ensaios de misturas betuminosas

Com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados é possível estabelecer algumas conclusões, quanto ao impacto dos diferentes fileres utilizados neste trabalho, no comportamento das misturas betuminosas. Salienta-se, no entanto, que estas conclusões são estabelecidas para as condições consideradas nos ensaios e para os materiais empregues, podendo eventualmente não serem as mais adequadas, se consideradas outras condições ou materiais com diferentes características.

Assim podemos concluir que:

- as misturas betuminosas com utilização da cal hidratada e da cal hidráulica apresentam melhor coesão. Esta conclusão é comprovada pelos valores obtidos nos ensaios Cantabro, onde se observam valores inferiores para a perda de massa nas misturas drenantes fabricadas com estes dois fileres;
- foi possível observar que a mistura betuminosa drenante com utilização da cal hidratada como filer, cumpriu com os requisitos impostos nos cadernos de encargos quanto aos valores da perda de massa no ensaio Cantabro;
- as misturas produzidas com estes dois fileres apresentam, melhor desempenho aos danos provocados pela água, observando-se:

- ✓ menores reduções da coesão nos ensaios Cantabro húmidos, o que permite concluir que estas misturas betuminosas são menos suscetíveis ao despreendimento de partículas;
- ✓ menor redução da resistência mecânica, comprovada pelos resultados dos ensaios de sensibilidade à água, sendo de prever pois, uma maior durabilidade das misturas betuminosas com a utilização destes fileres.
- comparando os resultados obtidos nos ensaios de sensibilidade à água para os dois fileres, observa-se melhor desempenho das misturas com cal hidratada, no caso de utilização de agregados graníticos, e a obtenção de resultados mais favoráveis para as misturas com cal hidráulica, quando na mistura betuminosa são utilizados agregados calcários;
- de todas as misturas estudadas, a produzida com a cal hidratada observou menor suscetibilidade à formação de rodeiras. Esta conclusão está de acordo com os resultados observados nos ensaios de reómetro de corte dinâmico, para igual temperatura, onde foram registados maiores valores da rigidez do mástique com cal hidratada;
- os maiores valores da rigidez, para os três patamares de temperatura estudados, registaram-se para a mistura betuminosa produzida com a cal hidratada;
- os valores do ângulo de fase das diferentes misturas betuminosas, obtidos nos ensaios de rigidez, não apresentam grandes variações. Apenas para a utilização da cal hidráulica e para o valor de frequência mais baixo se verifica, com o aumento da temperatura, uma tendência para uma estabilização do valor do ângulo de fase, relativamente às restantes misturas betuminosas;
- quanto ao comportamento à fadiga observa-se melhor desempenho por parte das misturas betuminosas fabricadas com a cal hidráulica e com a cal hidratada. De salientar os valores muito muito elevados registados para o declive da lei de fadiga para as misturas betuminosas com a utilização do filer recuperado de granito e do filer calcário.

7

CONCLUSÕES

7.1. Resumo do trabalho e conclusões finais

O conhecimento do comportamento dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas é fundamental, para se obterem misturas mais adequadas, em termos de desempenho e durabilidade, face às ações a que as mesmas vão estar sujeitas nos pavimentos.

Este trabalho pretende ser um contributo para o maior e melhor conhecimento das propriedades dos fileres utilizados no fabrico de misturas betuminosas, através do comportamento observado em ensaios laboratoriais realizados em mástiques e misturas betuminosas, por utilização de diversos tipos de fileres, agregados e betumes.

Na realidade é notória a dificuldade, por parte das entidades com responsabilidade nestas matérias, nomeadamente as portuguesas, em regulamentar sobre que tipos de fileres devem ser usados, e principalmente quais os que não devem, bem como os

valores limites a fixar para a dosagem deste componente, para os diferentes tipos de misturas betuminosas.

Foi com base nesta dificuldade que o presente trabalho foi estruturado, procurando dar respostas a estas questões, ou, pelo menos, contribuir para o esclarecimento do comportamento dos materiais em presença.

Ao longo dos vários capítulos foram sendo registadas algumas considerações, com base não só na bibliografia utilizada, mas principalmente, considerando os resultados dos ensaios realizados que foram apresentados e discutidos no capítulo 6.

Este capítulo pretende resumir o trabalho realizado, reforçar algumas das considerações apresentadas ao longo do mesmo, e apresentar as conclusões mais importantes estabelecidas com base em todo o trabalho realizado.

7.1.1. Planeamento das diferentes fases do trabalho

Este trabalho teve início na recolha de documentação referente à matéria a desenvolver, nomeadamente trabalhos de investigação semelhantes, normas e regulamentos, e manuais que abordam os conceitos mais teóricos, associados ao comportamento de todos os materiais em estudo.

Seguiu-se uma fase de identificação e seleção dos materiais a estudar, por forma a incluir no estudo, tanto quanto possível, os materiais de maior utilização em Portugal, no fabrico dos diversos tipos de misturas betuminosas. Procedeu-se, posteriormente, à recolha das amostras dos materiais selecionados: fileres, betumes, agregados e blocos de rocha.

Os primeiros ensaios de caracterização de materiais foram realizados aos betumes e aos fileres, observando-se desde logo, no caso dos fileres, algumas dificuldades na realização de alguns ensaios normalizados. Procurou-se, nestes casos, estabelecer metodologias alternativas, no sentido de se obterem resultados com maior qualidade.

Todos os resultados obtidos para os fileres foram sujeitos a tratamento estatístico, procurando estabelecer correlações para as diferentes variáveis estudadas.

Terminados os ensaios dos fileres, foi necessário selecionar, com base nos resultados obtidos, quais as amostras que seriam mantidas para a continuidade dos ensaios, pois seria impossível manter, nas fases seguintes do estudo, um número tão alargado de fileres.

Nesta fase do trabalho, considerou-se fundamental não desenvolver de imediato ensaios sobre as misturas betuminosas, mas sim, procurar estabelecer metodologias para o estudo do material mástique betuminoso, resultante da mistura do betume com o filler. Na realidade, relativamente às misturas betuminosas, este material é mais simples de trabalhar em laboratório: mais fácil de produzir, os provetes são consideravelmente mais pequenos, são substancialmente menores as quantidades das amostras, verificando-se também que as metodologias de ensaio são mais fáceis de repetir e de replicar para diferentes amostras. Estes aspetos foram considerados relevantes, dado que um dos principais objetivos era o estudo da reologia dos materiais. Outra das razões principais para realizar o estudo laboratorial do mástique, antes do estudo das misturas betuminosas, reside no facto de, desta forma, não serem introduzidas no processo, duas outras variáveis: os agregados e os vazios da mistura betuminosa.

No entanto, verifica-se não existirem metodologias de ensaio normalizadas para a maior parte das propriedades que se pretende avaliar nos mástiques betuminosos.

Optou-se então por utilizar, nos ensaios dos mástiques, as metodologias existentes na caracterização dos betumes, sendo no entanto necessário estabelecer alterações para atender às características próprias dos mástiques betuminosos. Para o ensaio de avaliação da adesão do mástique ao agregado, foi utilizado um método ainda não normalizado, tendo sido necessário alterar a metodologia existente e criar acessórios que, com o equipamento disponível para este trabalho, fosse possível atingir os objetivos pretendidos.

Terminados os ensaios nos mástiques betuminosos, e depois de realizada a análise e tratamento estatístico aos resultados obtidos para as diferentes propriedades avaliadas, foi necessário, de novo, restringir o número de fileres a utilizar nos ensaios das misturas betuminosas.

O trabalho de laboratório terminou com a realização dos ensaios a misturas betuminosas, com os quais se pretendeu avaliar o impacto dos fileres no desempenho daqueles materiais.

7.1.2. Conclusões finais

Das muitas constatações e conclusões que foram sendo identificadas ao longo do texto, descrevem-se de seguida as conclusões mais importantes, estabelecidas com base em todo o trabalho desenvolvido neste estudo.

No que diz respeito à normalização europeia existente para a caracterização do material filer, considera-se necessário estabelecer algumas correções aos documentos em vigor, procedendo igualmente à elaboração de novas normas de ensaio e à anulação de outras existentes. Assim, como conclusões deste trabalho, propõem-se:

- ✓ a elaboração de uma norma para avaliação das propriedades percutíveis dos fileres recuperados de central, como forma de identificar o estado de contaminação das amostras, devendo o resultado obtido ser explicitado juntamente com os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização dos fileres;
- ✓ alteração às normas de ensaio dos fileres, definindo um outro critério para a quantidade dos provetes a ensaiar, adequando-a aos diferentes tipos de fileres;
- ✓ definir um novo procedimento para a determinação da massa volúmica, adequando o método existente, por forma a que os resultados obtidos nos ensaios apresentem maior qualidade;
- ✓ estabelecer uma nova metodologia para avaliação da granulometria dos fileres que permita, não só o conhecimento da granulometria destes materiais, mas principalmente, facilitar aos produtores na realização do controlo do produto. Considera-se o método de difração laser o mais adequado;
- ✓ anular a norma para a quantificação do número de betume do filer, EN 13179-2 (CEN, 2000), dado que a propriedade quantificada neste ensaio é já avaliada no ensaio dos vazios do filer seco compactado;
- ✓ inclusão na norma de produto dos agregados para misturas betuminosas, EN 13043 (CEN, 2002), de novas categorias para quase todas as propriedades do filer, de modo que possam ser classificados todos os tipos de produtos.

Ficou provado neste trabalho que as metodologias para avaliar as propriedades dos betumes, como a viscosidade, rigidez e envelhecimento, são adequadas para a caracterização dos mástiques betuminosos, desde que devidamente alteradas para atender às características destes produtos. Dado que os resultados dos ensaios realizados neste trabalho provaram que o desempenho das misturas betuminosas, nomeadamente quanto à rigidez e deformações permanentes, pode ser previsto, com alguma razoabilidade, através do conhecimento da reologia dos mástiques betuminosos, entende-se que deverão ser estabelecidas normas europeias para a quantificação das propriedades destes materiais. A elaboração destas normas de ensaio

teria ainda a vantagem de estabelecer uma metodologia para o fabrico, em laboratório, do mástique betuminoso, permitindo a obtenção de resultados de ensaios mais reprodutíveis e, assim, possíveis de serem confrontados resultados de ensaios obtidos por diferentes autores.

Os ensaios de tração direta do tipo “*pull-off*” demonstraram possuir características adequadas, obtendo-se resultados que permitem a previsão da adesão mástique/agregado, pelo que se propõem a inclusão deste ensaio na normalização europeia dos betumes e mástiques betuminosos.

Os resultados dos ensaios realizados aos fileres permitem concluir:

- ✓ todas as propriedades, geométricas, físicas e químicas, são influenciadas pela origem geológica, no caso dos fileres minerais, e pelo processo de fabrico, no caso dos fileres artificiais;
- ✓ os fileres recuperados de central observam, relativamente aos agregados que lhes deram origem, características muito distintas, nomeadamente no que diz respeito às propriedades químicas. Face a esta conclusão, os fileres recuperados de central, deveriam ser considerados como fileres artificiais e, deste modo, serem sujeitos aos requisitos da marcação CE dos produtos da construção, se utilizados em misturas betuminosas;
- ✓ face às elevadas variações observadas para as propriedades dos fileres, nomeadamente quanto à massa volúmica, recomenda-se que a fixação dos requisitos para a relação filer/betume, a existir, seja estabelecida não em massa, mas sim em volume;
- ✓ das diferentes propriedades dos fileres e dos mástiques betuminosos, e para a gama de temperaturas estudada, apenas a variação da temperatura anel e bola dos fileres se correlaciona, de forma aceitável, com a viscosidade dos mástiques. Esta constatação está de acordo com o princípio do ensaio de variação da temperatura anel e bola, que, de forma indireta, avalia a viscosidade da amostra ensaiada.

Também os ensaios realizados nos mástiques betuminosos permitiram estabelecer algumas conclusões importantes:

- ✓ a viscosidade relativa do mástique betuminoso depende, não só do tipo e concentração do filer no mástique, mas também da temperatura do mástique betuminoso. Deste modo, procurou-se obter um modelo matemático que pudesse

representar uma melhoria da equação estabelecida por Pearce em 2004, não tendo, no entanto, sido possível obter um ajustamento robusto entre as diversas variáveis. Assim, aconselha-se a utilização desta equação, mas com alguma prudência para valores da temperatura inferiores a 140 °C;

- ✓ a cal hidratada apresenta-se como um filer muito ativo, originando um mástique betuminoso muito viscoso, não permitindo a realização de ensaios da temperatura anel e bola bem como para a determinação da viscosidade com viscosímetro rotativo, para as temperaturas mais baixas e para os valores de concentração do filer utilizados neste trabalho;
- ✓ a cal hidratada, a cal hidráulica e os fileres recuperados de granito são os que produzem mástiques betuminosos mais viscosos, sendo os fileres de calcário, naturais e recuperados, os que conduzem à obtenção de mástiques betuminosos menos viscosos;
- ✓ nos ensaios realizados para o estudo da influência do filer, no processo de envelhecimento do mástique, ficou demonstrado que o envelhecimento dos betumes ocorre de forma mais acelerada, que o envelhecimento dos mástiques. Assim se conclui da importância do filer nas misturas betuminosas, não só garantindo propriedades fundamentais à misturas, como compacidade e rigidez, mas também retardando o processo de envelhecimento do betume. A seleção do filer a utilizar numa mistura betuminosa deve também atender a este aspeto, especialmente para o tipo de betumes e misturas mais suscetíveis a processos de oxidação. A cal hidratada demonstrou, face aos restantes fileres estudados, potenciar esta característica, observando-se menores incrementos da temperatura anel e bola para os mástiques envelhecidos, face aos valores da mesma característica para os mástiques não submetidos a envelhecimento prévio;
- ✓ os resultados dos ensaios de arrancamento do tipo “*pull-off*” recomendam, especialmente no caso da utilização de agregados graníticos na mistura betuminosa, a utilização da cal hidratada como filer, sempre que se pretenda o aumento da componente química da adesividade mástique/agregado. O aumento da adesividade, observado nas misturas betuminosas com a utilização da cal hidratada, é confirmado pelos resultados, não só dos ensaios Cantabro, mas também dos ensaios de sensibilidade à água;
- ✓ para o caso das misturas betuminosas com agregados calcários, os ensaios “*pull-off*” e de sensibilidade à água permitem obter conclusões semelhantes, para as

misturas onde foram utilizados estes dois tipos de fileres, mas com valores ligeiramente mais favoráveis no caso da utilização da cal hidráulica;

- ✓ no caso da utilização do betume modificado verifica-se que o valor da rigidez dos mástiques é pouco dependente do tipo de filer utilizado, observando-se que a reologia observada nos mástiques é muito semelhante à registada para o betume. Esta mesma conclusão já não pode ser estabelecida para o caso do betume 35/50. Na realidade, verificam-se diferenças significativas no comportamento reológico dos mástiques com utilização de diferentes tipos de fileres. O cimento conduz a mástiques com maiores valores de rigidez e a utilização da cal hidratada reflete-se em valores mais baixos do ângulo de fase. Não foi possível concluir, no entanto, se estas características se refletem no comportamento das misturas betuminosas.

De seguida são estabelecidas algumas conclusões, decorrentes da análise dos resultados observados nos ensaios realizados com provetes de mistura betuminosa, obtidos por serragem de placas produzidas em laboratório. De referir que estas conclusões devem, no entanto, ser analisadas com alguma incerteza, dado o pequeno número de amostras ensaiadas e, principalmente, face às inúmeras variáveis introduzidas quando são preparadas aquelas placas. Na realidade, apesar de todo o controlo laboratorial imposto neste trabalho no processo de fabrico e compactação das placas, podem verificar-se algumas variações durante a sua produção, tais como temperatura no fabrico e na compactação, envolvimento dos componentes, energia e metodologia de compactação. Estas variações podem afetar as características finais das misturas betuminosas, tais como a porosidade e distribuição dos componentes na matriz da mistura betuminosa. Assim, e apesar das considerações referidas, estabelecem-se de seguida as seguintes conclusões:

- ✓ no que diz respeito à suscetibilidade das misturas betuminosas à formação de rodeiras, observa-se melhor desempenho da mistura com utilização da cal hidratada, observando-se valores do declive máximo da rodeira inferiores aos obtidos para as restantes misturas betuminosas. Esta conclusão está de acordo com o maior valor da rigidez observado nos ensaios com reómetro de corte, realizados para o mástiques betuminoso com cal hidratada, para a mesma gama de temperatura utilizada no ensaio “*wheel tracking*”;
- ✓ a maior rigidez observada para os mástiques com cal hidratada aparece refletida nos valores da rigidez das misturas betuminosas produzidas, observando-se, para

todas as frequências e temperaturas utilizadas nos ensaios, valores da rigidez superiores para as misturas betuminosas produzidas com cal hidratada.

- ✓ também o tipo de filer utilizado nas misturas betuminosas parece originar comportamentos distintos, no que diz respeito à fadiga das misturas betuminosas. Nos ensaios de fadiga realizados, observam-se piores desempenhos na utilização dos fileres recuperado de granito e comercial calcário que nas misturas betuminosas com a utilização da cal hidratada ou da cal hidráulica. Face aos valores obtidos nos ensaios com reómetro de corte, será de prever que este comportamento não se verifique em misturas betuminosas com betumes modificados, dado que para estes o comportamento reológico é definido quase exclusivamente pelo betume.

Por forma a garantir a qualidade dos fileres no fabrico de misturas betuminosas sugere-se que sejam fixados, em recomendações técnicas e nos documentos contratuais, valores limites apenas para as seguintes características:

- ✓ granulometria, garantindo que o diâmetro das partículas existentes no filer estejam de acordo com a definição do filer;
- ✓ solubilidade em água, garantindo a não existência de materiais estranhos ao filer;
- ✓ valor azul de metileno, para evitar a utilização de fileres com materiais argilosos.

Observa-se ainda a necessidade de estabelecer limites mínimos e máximos para a relação volumétrica filer/betume, ou filer/mástique, pretendendo-se assim obter dois objetivos:

- ✓ suficiente quantidade de filer capaz de, não só resultar uma compacidade adequada para a mistura betuminosa, mas também, na rigidificação necessária para o betume;
- ✓ garantir, por outro lado, que não resulte um mástique demasiado rígido, permitindo obter uma mistura betuminosa com coesão adequada ao processo de colocação e compactação da camada.

Considera-se, porém, não ser matéria fácil o estabelecimento destes limites, e muito menos, o estabelecimento de uma relação ótima para esta relação com base apenas nas características do filer.

7.2. Trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho, e na sua fase final com a análise global de todos os resultados obtidos nos ensaios, foram identificadas algumas recomendações para desenvolvimentos em trabalhos futuros. Prevê-se que estas recomendações, que se apresentam de seguida, possam contribuir para identificar caminhos de investigação, no sentido de dar resposta a questões que foram surgindo durante a realização do trabalho, e no esclarecimento de algumas dúvidas que subsistem no final.

Assim, recomenda-se:

- ✓ realizar estudos sobre o comportamento de betumes e mástiques betuminosos, para temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, procurando estabelecer:
 - condições para a definição das temperaturas mais adequadas para o fabrico e compactação de uma determinada mistura betuminosa, atendendo não à viscosidade do betume, como adotado atualmente, mas sim, às propriedades do mástique betuminoso, nomeadamente a sua viscosidade;
 - um modelo matemático para a previsão da viscosidade relativa do mástique, através do conhecimento da variação da temperatura anel e bola do filer, realizando ensaios com viscosímetro rotativo para valores das concentrações do filer diferentes e em maior número dos utilizados neste trabalho;
 - limites inferior e superior para a relação filer/betume a adotar nas misturas betuminosas, com base em ensaios avaliadores da reologia do mástique betuminoso. O conhecimento da reologia do mástique permitiria definir o valor mais adequado para aquela relação, atendendo à necessidade de se obter, para a mistura betuminosa, adequadas propriedades de coesão e de molhabilidade dos agregados, durante o processo de fabrico, bem como, rigidez e suscetibilidade à temperatura por parte da mistura betuminosa quando colocada no pavimento.
- ✓ realizar ensaios por forma a estabelecer a influência do modo como a cal hidratada é adicionada aos restantes componentes, no processo de fabrico de uma mistura betuminosa;
- ✓ selecionar outros componentes para as misturas betuminosas, como por exemplo as misturas betuminosas recicladas, bem como componentes de outros tipos e origens, como sejam agregados basálticos e betumes borracha;

- ✓ estudar a influência dos fileres no comportamento de mástiques e misturas betuminosas para o caso de exposição a muito baixas temperaturas;
- ✓ realizar trechos experimentais para a validação dos estudos laboratoriais, nas misturas betuminosas colocadas em camadas dos pavimentos;
- ✓ estabelecer, através da realização de ensaios com reómetro de corte dinâmico, o comportamento da rigidez e ângulo de fase para outros valores da concentração do filer no mástique betuminoso;
- ✓ estudar a influência da microrugosidade da superfície dos provetes de rocha nos resultados dos ensaios “*pull-off*”.

Bibliografia

- Ahmed, F. F.; Bahia, H. U. (2010). *Modelling of asphalt mastic in terms of filler bitumen interaction*. Road materials and pavement design.
- Airey, G D; Westwood, D. (2004). *High temperature viscosity of polymer ad filler modified binder systems*. Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume congress, Vienna.
- Alencar, .A. E. V.; Costa, E., F.; Soares, J. B.; Soares, S. A. (2009). *Efeito da adição do polímero EVA e aditivos nas propriedades reológicas e envelhecimento oxidativo dos ligantes modificados*.
- Anderson, D. A.; Goetz, W. H. (1973). *Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler asphalt mixtures*. Joint Highway Research Project.
- Anderson, D. A. ; Tarris, J. P. (1982). *Adding dust collector fines to asphalt paving mixtures*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board nº 1728.
- Anderson, D. A; Christensen, D. W.; Bahia, H. U.; Dongre, R.; Sharma, M. G.; Antle, C. E.; Button, J. (1994). *Binder characterization and evaluation*. Vol. 3: Physical Characterization. SHRP-A-369.
- Antunes, M. L. (2009). *Ensaio de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas*. InIR.
- Antunes, V. F. S. (2013). *Influência do filler no comportamento de mástiques betuminosos*. Tese para a obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, UNL Universidade Nova de Lisboa.
- APORBET (1998). Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas. *Misturas betuminosas. Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação*.
- Azevedo, M. C. M. (1993). *Características mecânicas de misturas betuminosas para camadas de base de pavimentos*. Tese para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa.
- Azevedo, M. C. M. (2010). *Construção e reabilitação de pavimentos. Agregados*. InIR.
- Bahia, H.; Moraes, R.; Velásques, R. (2010). *Measuring asphalt-aggregate bond strenght under diferente conditions*.
- Bahia, H. U. (2011). *Test methods and specification criteria for mineral filler in HMA*. NCHRP 9-45. University of Wisconsin Madison
- Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G.; Fernandes, J. L.; Roque, R. (2012). *A importância do filler para o bom desempenho de misturas asfálticas*.

- Barnes, H.; Hutton, J.; Walters, K. (1989). *An introduction to rheology*. ISSN 0169-3107
- Barros, E. S. S. (2012). Comportamento dos betumes em função da temperatura. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- Behiry, A. E. A. M. (2012). *Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures*. Ain Shams Engineering Journal.
- Bhasin, A.(2006). *Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water*. Dissertation for the degree of Doctor.
- Bianchetto, H.; Miró, R.; Jiménez, F. P.;Martinez, A. H. (2006). *Effect of calcareous fillers on bituminous mix aging*. Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Bock, A. L.; Hartmann, D.; Budny, J.; Specht, L. P.; Ceratti, J. A. P (2009). *Estudo laboratorial sobre efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico*.
- Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L. P. (2006). *Pavimentos Rodoviários*. Editora Almedina.
- Braham, A.; Ni, F.; Zhang, M. (2010). *Predicting rutting in China*. Ttransportation Research Board, 89th annual meeting.
- Buisson, J.; Del Pozo, J.; Lepe, A. P.; Felipo, J.; Santiago, J. G.; Potti, J. J. (2009). *Envejecimiento de los ligantes bituminosos empleados en mezclas recicladas en caliente com muy altas tasas*. IV Jornada Nacional ASEFMA.
- Buttlar, W. G.; Bozkurt, D.; Khateeb, G.(1999). *Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Vol. 1681, pp.157-169.
- Canestrari, F.; Cardone, F.; Graziani, A.; Santagata, F. A.; Bahia, H. U. (2010). *Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage*. Road materials and pavement design.
- Cardone, F.; Frigio, F.; Ferrotti, G.; Canestrari, F. (2015). Influence of mineral fillers on the rheological response of polymer-modified bitumens and mastics. Journal of Traffic and Transportation Engineering.
- Chang, R. (2008). *General Chemistry. The essential concepts*. ISBN 978-0-07-304851-2.
- Chen, J.S.; Kuo, P.H.; Lin, P. S.; Huang, C. C.; Lin, K. Y. (2008). *Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler*. Materials and Structures, 41:1015-1024.

Cooley Jr, L. A.; Kandhal, P. S.; Buchanam, M. S.; Fee, F.; Epps, A. (2000). *Loaded Wheel testers in the United States: State of the practice*.

Copeland, A. R. (2007). Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems. Dissertação para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, Nashville.

Costa, A. R. (2011). *Fluorescência de raios-X no controlo da qualidade de amostras sólidas*. FCTUC Química - Tese de Mestrado.

Cramer, P.; Herz, G.; Radenberg, M. (2001). Kalkhydrat: *Eine Alternative zur Modifizierung des Bindemittels*. ISSN: 0945-6228

Craus, J.; Ishai, I.; Sides, A. (1978). *Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.47.

Cui, S.; Blackman, B. R. K.; Kinloch, A. J.; Taylor, A. C. (2014). *An investigation into the durability of road surface materials*.

Curtis, C.; Jeon, Y. W. (1988) *An investigation of the effect of antistripping agents on the silica adsorption of asphalt model functionalities*. NCAT Report 88-04. Auburn University, Alabama.

Curtis, C. W. (1992). *Investigation of asphalt-aggregate interactions in asphalt pavements*. Auburn University, Alabama.

Curtis, C. W.; Ensley, K.; Epps, J. (1933). SHRP-A-341. Fundamental properties of Asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption.

Delorme, J. L.; Roche, C.; Wendling, L. (2007). *Bituminous Mixtures Design Guide, LCPC*.

De Visscher, J.; Soenen, H.; Vanelstraete, A.; Redelius, P. (2004). *A comparison of the zero shear viscosity from oscillation tests and the repeated creep test*. ISBN 90-802884-4-6. Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume congress, Vienna, 2004.

Dony, A.; Colin, J.; Tougard, C.; Lesueur, D. (2012). *Resistance aux dégâts hivernaux des enrobés bitumineux contenant de la chaux hydratée*. Routes & Services N° 29 Dossier Viabilité Hivernale, janvier-février.

Dueñas, A. P.; Santiago, J. L. G.; Ras, R. T.; Cuervo, J. J. P (2009). *Nuevas tecnologías en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos*. IV Jornada Nacional ASEFMA.

Ebrahim, H. ; Birgisson, B; Kringos, N. (2014). *A new protocol for measuring bituminous mastic viscosity as a function of its filler concentration*.

Edwards, Y.; Redelius, P. (2003). *Rheological effects of waxes in bitumen*. Energy Fuels, 17 (3), pp 511–520.

Edwards, Y.; Tasdemir, Y.; Isacsson, U. (2006). *Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 high and medium temperature performance*. Construction and Building Materials, 21; 1899-1908.

Edwards, Y. (2011). *Influence of waxes on bitumen and asphalt concrete mixtures performance*.

Estradas de Portugal, S.A. (2009). *Caderno de Encargos - 15.03 – Pavimentação. Métodos construtivos*.

Estradas de Portugal, S.A. (2012). *Caderno de Encargos - 14.03 – Pavimentação. Características dos materiais*.

EuLA,(2011). *Hydrated lime a prevent additive for durable asphalt pavements*. Report to the European Lime Association, Asphalt task force.

Faheem, A. F.; Haifang, W.; Lawrence, S.; Bahia, H. U. (2008). Effect of mineral filler on damage resistance characteristics of asphalt binders. Journal of the association of asphalt paving technologists. Volume: 77. ISSN: 0270-2932.

Faheem, A. F., Hintz, C.; Bahia, H.; Al-Qadi, I. (2012). *Influence of filler fractional voids mastic and mixture performance*. Annual meeting, TRB 2012.

Fazaeli, H.; Behbahani, H.; Amini, A.; Rahmani, J.; Yadollahi, G. (2012). *High and low temperature properties of FT-Paraffin-Modified Bitumen*.

Fernandes, P. R. N. (2007). *Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAS)*. Dissertação para obtenção do título de Mestre, Curso de Engenharia Química Inorgânica, U.F. do Ceará.

França, S. C. A.; Couto, H. J. B (2007). *Análise microgranulométrica - Malvern e Sedigraph*.

Freitas, S. M. R. S. M (2007). *Albumin and Fibronectin Adsorption and Osteoblast Adhesion on Titanium Oxides*. Tese para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP, Porto.

Galán, M. P. C; Gabeiras, L. E.; Lázaro, . A. H.; Sáez, R. J. (2012). Resultados de interlaboratorio español sobre el ensayo de rigidez de mezclas betuminosas. II Jornada de ensayos de caracterización de mezclas betuminosas. ASEFMA.

Genovese, D. B. (2012). *Shear rheology of hard-sphere, dispersed, and aggregated suspensions, and filler-matrix composites*.

Grabowski, W.; Wilanowicz, J.; Sobol, T.(2009). *Structural and functional properties of mineral fillers modified with hydrated lime*. 6 th international conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control, MAIREPAV 6.

Greyling, A. H. (2012). *Development of a standard test method for determining the bitumen bond strength of emulsions-a South African perspective*. Degree of master of science in engineering.

Guericke, R (2000). *Results of ARBIT test program 1998/1999 involving 36 unmodified and modified bituminous binders on German market*. Eurasphalt & Eurobitume.

Hachiya, Y.; Noruma, K.; Shen, J. (2003). *Accelerated aging tests for asphalt concretes*. 36th RILEM symposium – Zurique.

Hao, P.; Hachiya, Y. (2003). *Moisture susceptibility of asphalt mixture and effectiveness of anti-stripping additives*. Japan society civil engineers.

Harris, B.; Stuart, K. (1995). *Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt*. Journal of the association of asphalt paving technologists, Vol 64.

Harrigan, E. T.; Leahy, R. B.; Youtcheff, J. S. (1994). *The superpave Mix Design system. Manual of specifications, test methods and practices*. SHRP -A – 379.

Hefer, A.; Little, D. (2005). *Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond*. Research report ICAR - 505-1. International Center for Aggregates Research.

Herrero, O.; Needham, D.; Wallin, T.; Costa, A., Loma, J. (2009). *Evaluación de la resistencia conservada mediante los nuevos ensayos*. UNE-EN 12697-11 y 12. XV CILA.

Hesami, E.; Birgisson, B.; Kringos, N. (2014). *A new protocol for measuring bituminous mastic viscosity as a function of its filler concentration*. Road Materials and Pavement Design. Vol 15.

Hicks, R. G; Scholz, T. V. (2003). *Life Cycles Costs for Lime in HMA*.

Horak, E.; Makundila, E. (2011). *The use of Rigden voids and variations of the ring and ball test to determine the effect of filler sized in sand emulsion mixes*. 10 th conference on asphalt pavements for Southern Africa.

Huang, S. C.; Tia, M.; Ruth, B. E. (1996). *Laboratory aging methods for simulation of field aging os asphalts*. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 8, pp 147-152.

- Huang, S. C., Branthaver, J. F., Roberts, R. E. (2003). *The influence of aggregate on moisture susceptibility in terms of asphalt-aggregate interactions*. 6th RILEM symposium, Zurich.
- Huang, B., Shu, X.; Chen, X. (2007). *Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties*. International Journal of Pavement Engineering.
- Hunter, E. E.; Ksaibati, K. (2002). *Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes*.
- Isacsson, U.; Zeng, H. (1997). *Relationships between bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt*. Construction and building materials Vol 11, Nº 2, pp 83-91.
- Ishai, I.; Craus, J.; Sides, A. (1980). *A model for relating filler properties to optimal behavior of bituminous mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists.
- Jakarni, F. M. (2012). *Adhesion of asphalt mixtures*. Tese para a obtenção do grau de Doutor. Universidade de Nottingham.
- Jamieson, I. L.; Moulthrop, J.S.; Jones, D.R. (1993). *SHRP results on binder-aggregate adhesion and resistance to stripping*. Eurobitume Congress, 5th Stockholm, Sweden.
- Jiménez, F. E. P.; Recasens, R. M.; Martinez, A. H. (2004). *Characterisation and design of hot-recycled bituminous mixtures*. International RILEM Conference.
- Jiménez, F. P.; Recasens, R.; Martinez, A. (2011). *Effect of filler nature and content*. Road materials and pavement design.
- Jorgensen, T. (2005). *Water susceptibility of asphalt mixtures: Testing the effect of adhesion agents on different binder/aggregate mixtures*. The 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 27-28 June, Trondheim, Norway.
- Judele, L. (2011). *The mechanism of bitumen adhesion to aggregates the influence of mineralogic nature*. Buletin Institute Politehnic Din IASI Universidade Técnica.
- Junta Autónoma de Estradas (1990). Caderno de encargos.
- Kandhal, P. (1980) – *Evaluation of baghouse fines in bituminous paving mixtures*.
- Kandal, P. S.; Lynn, C. Y; Parker, F. (1998). *Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures*. NCAT Report 98-02. National Center for Asphalt Technology, Auburn.
- Kavussi, A.; Hicks, R. G. (1997). *Properties of bituminous mixtures containing different fillers*. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists. Volume 66.

Kiggundu, B. M.; Roberts, F. L. (1988). *The success/failure of methods used to predict the stripping potencial*. NCAT Report 88-03.

Kim, Y.; Little, Dallas. N. (2003). Mechanistic evaluation of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics.

Lauger, J.; Bernzen, M. (2000). *Getting the zero viscosity of polymer melts with different rheological tests*. Vol. 8 Papers from NRC in Helsinki. Nordic Rheology Society.

Lent, D. Q.; Ven, M.F.C.; Molenaar, A. A. A. (2011). *Roughness as an important parameter in adhesion considerations*. The 10 th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.

Lesueur, D.; Little, D. N. (1999). *Effect of hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen*. Transportation Research Record.

Lesueur, D. (2009). *The colloidal structure of bitumen*.

Lesueur, D.; Petit, J.; Ritter, H. J. (2013). *The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures, a state-of-the-art review*. Road Materials and Pavement Design.

Little, D.; Petersen, C. (2011). *Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited*. Estabilizaciones con cal en carreteras y ferrocarriles.

LNEC, 2008. *Caracterização de agregados produzidos em Portugal de acordo com as referências normativas EN 13043 e EN 13242*.

Lu, X.; Isacsson, U. (1999). *Artificial aging of polymer modified bitumens*. Royal Institute of Technology, Division of Highway Engineering, SE-100 44, Stockholm, Sweden.

Lu, X.; Langton, M.; Olofsson, P.; Redelius, P. (2004). *Microstructure of wax crystals in bitumen*. The 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 12 – 14 May, 2004.

Lu, X.; Redelius, P. (2006). *Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance*. Construction and building materials.

Lu, X.; Kalman, B.; Redelius, P. (2008). *A simple test method for determination of waxes*. The 4th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Copenhagen, May 2008.

Lu, X.; Sandman, B.; Redelius, P. (2010). *Aging Characteristics of polymer modified in porous asphalt pavements*.

Lutif, J. E. S. ; KIM, Y. R. ; Soares, Jorge B. (2008). *Influência do método de adição de cal hidratada em misturas asfálticas para reduzir os danos devido à umidade em pavimentos asfálticos*. XXII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes ANPET.

Manuppella, G.; Moreira, J. C. B. (1975). *Panorama dos calcários Jurássicos Portugueses*. Boletim de Minas.

Manuppella, B.; Balacó, J.C. M.; Romão, M. L. (1980). *Panorama dos dolomitos e calcários dolomíticos portugueses*. Boletim de Minas Volume 17 nº 4.

Masad, E.; Al-Rousan, T.; Button, J.; Little, D. (2007). *Test methods for characterizing aggregate shape texture and angularity*. Transportation Research Board. Report 555.

McCann, M.; Sebaaly, P. (2001). *A quantitative evaluation of stripping potential in hot mix asphalt using ultrasonic energy for moisture accelerated conditioning*. Transportation Research Record 1767 Washington D.C. Pp. 48-59.

Merkus, H. G. (2009). *Particle size measurements; fundamentals, practice, quality*. Springer ISBN: 978-1-4020-9015-8.

Miller, T. D.; Greyling, A.; Bahia, H. U.; Jenkins, K. (2010). *Development of a test method for determining emulsion bond strength using the bitumen bond strength (BBS) test*. International Sprayed sealing conference - Sustaining sprayed sealing practice, Melbourne, Australia.

Miller, T. D. (2012). *Standard test method for determining emulsion bond strength using the bitumen bond strength (BBS) test (draft)*. University of Wisconsin Madison.

Mingard, K.; Morrell, R.; Jackson, P.; Lawson, S.; Patel, S. Buxton, R. (2009). *Good practice guide to improving the consistency of particle size measurement*. ISSN 1368-6550.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2014) – *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, PG-3*.

Miranda, Marta Daniela Azevedo (2014). *A influência dos fileres no comportamento viscoso dos mástiques betuminosos*. Tese para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geotécnica, ISEP.

Mitchell, J. G. ; Lee, A. R. (1939). *The evaluation of fillers for tar and other bituminous surfaces*. J. Soc. Chem. Ind. 58 299-306.

Mogawer, W.S. (1996). *Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures*. Transportation Research Record. Journal of Transportation Research Board.

Monteiro, A. J. S (2004). *Revestimentos multicamada PVD com comportamento electrocrômico*. Tese para obtenção de grau de Mestrado, UM.

Moraes, R.; Velasquez, R. (2010). *Measuring asphalt-aggregate bond strength under different conditions*.

Moraes, R.; Velasquez, R.; Bahia, H. U. (2010). *Measuring effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strenght test*. Ttransport Research Board, annual meeting.

Moraes, R.; Bahia, H (2014). *Effect of mineral filler on changes in molecular size distribution of asphalts during oxidative ageing*.

Muller, J.; Jenkins, K. J (2011). *The use of an extended rolling thin film ageing method as an alternative to the pressurised ageing vessel method in the determination of bitumen durability*. The 10 th conference on asphalt pavements for Southern Africa.

Muniandy, R.; Aburkaba, E.; Yunus, R.; Hamid, H.; Salihudin, H. (2012). *Influence of mineral filler particle size and type on rheological and performance properties of SMA Asphalt-filler mastics*. Asian Journal of Applied Sciences, 522-537. ISSN 1996-3343.

NCHRP Report 9-45 (2010). *Test methods and specification criteria for mineral filler used in HMA*. University of Wisconsin Madison. National Cooperative Highway Research Program.

NCHRP (2011). National Cooperative Highway Research Program. Research results digest 357 – *Test methods and specification criteria for mineral filler used in hot mix asphalt*.

NCHRP (2013) National Cooperative Highway Research Program. Research results digest 382 – *Measuring Cement particle size and surface area by laser diffraction*.

Nicholls, C. (2006). *Analysis of available data for validation of bitumen tests*.

NLA, National Lime Association (2001). *Hydrated lime more than just a filler*.

NLA, National Lime Association (2003). *How to add hydrated lime to asphalt. An overview of current methods*.

Nordgren, T.; Olsson, K. (2012). Asphalt concrete test sections containing bitumen of different origins. The 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istambul.

Othman, A. M. (2011). *Evaluation of hydrated lime effect on the performance of rubber-Modified HMA Mixtures*. Journal of elastomers and plastics, Vol 43.

Orange, G.; Dupuis, D.; Martin, J. V.; Farcas, F.; Such, C.; Marcant, B (2004). *Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: Properties - micro-structure relationship*. The 3^o euraspalt e eurobitume Vienna.

Palha, C. A. O. F.; Silva, H. M. R. D.; Oliveira, J. R. M. (2009). *Comparação de diferentes métodos de ensaio normalizados para avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga das misturas betuminosas*.

Pavol, D.; Marcela, H.; Jozef, V. (2011). *Methods for determination of affinity between aggregate and bitumen*. The 45 th International Petroleum Conference, Republica Bratislava.

Pearce, B. L. (2004). *Comparison of temperature variations for softening point apparatus with varying filler/binder ratios*. The 8 th conference on asphalt pavements for Southern Africa.

Pearce, B. L. (2007). *Avaliação da adesividade ligante agregado em misturas asfálticas por técnicas de análise de superfícies*. Tese para obtenção de grau de mestre Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Pepe, A.; Dueñas, A.; Santiago, J. (2009). *Reciclado de mezclas drenantes*. IV Jornada Nacional ASEFMA.

Pereira, A. I. R. (2015). *Caracterização reológica e avaliação da resistência à fadiga de betumes com o reómetro de corte dinâmico*. Tese para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

Pfeiffer J. P. ; Van Doormaal P. M. (1936). *The rheological properties of asphaltic bitumen*. Journal Institute. Petroleum Technologists Vol 22, p. 414.

Phillips, M.; Robertus, C. (1996). *Binder rheology and asphaltic pavement permanent deformation; the zero shear viscosity*. Euraspalt & Eurobitume.

Phromsorn, C. J.; Kennedy, T. W. (1995). *Evaluation of Laboratory Methods Simulating Aging Effects of Asphalt Binder*. Transportation Research Record 1488, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 13-20.

Pinilla, A. (1965). *O sistema filler-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas*.

Prowell, B. D.; Zhang, J.; Brown, E. R. (2005). *Aggregate Properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt*. NCHRP Report 539.

Quaresma, L.; Antunes, M. L. (2002). *Filer granítico em misturas betuminosas*. Relatório LNEC.

Quesada, D. M.; Zamanillo, A. V.; Pérez, M. A. C.; Fresno, D. C. (2013). Experimental study of bituminous mastic behaviour using different fillers based on the UCL method. *Journal of Civil Engineering and Management*.

Queirós, I. B. (2011). *Contribuição da fluorescência de Raios X na avaliação e modelação de georrecursos*. Dissertação para obtenção do grau de mestrado em Geotecnia no ISEP.

Rawle, A. (2002). *The importance of particle sizing to the coating industry*.

Read, J.; Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. Fifth edition. ISBN: 0 7277 3220 X.

Recasens, M. R. (1994). *Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cantabro*. Tese para obtenção do Grau de Doutoramento. Universidade Politécnica de Catalunha, Espanha.

Recasens, M.; Rodrigo, J.; Reguero, M.; Haydée, A.; Jiménez, P.; Bianchetto, F. E.; Daniel, H. (2005). Effect of filler on the aging potencial of asphalt mixtures.

Ribeiro, J. M. Q. (1995). *Análise do Comportamento de Camadas de Desgaste Drenante com Materiais Graníticos*. Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP.

Richardson, C. (1905). *The modern asphalt pavement*. John Wiley & Sons, London, Chapman & Hall, Limited.

Richardson, C. (1915). *The theory of the perfect sheet asphalt surface*. *Journal of Industrial Engineering and Chemistry*.

Rigden (1947). *The use of fillers in bituminous road surfacing*. *Journal of the society of chemical industry*. Vol. 66 september.

Saal, R.N.J.; Koens, G; (1933). *Investigation into the plastic properties of asphaltic bitumens*. *Journal Institute. Petroleum Technologists* Vol 19, p. 176.

Sá da Costa, M. (2012). *Regeneração de betumes no âmbito da reciclagem a quente em central*. Tese para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Materiais.

Santos, J. N. (2002). *Aplicação de cimentos em pavimentos*. 2º Congresso Rodoviário Português.

Santos, André (2011). *Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados*. Tese para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

Santos, Bruno Alberto Barroso (2013). Caracterização física e química de fileres para fabrico de misturas betuminosas. Tese para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, ISEP.

Sequeira, A. C.; Frade, D.; Gonçalves, P. (2007). *Cal hidráulica, um ligante para a reabilitação*. SETRA, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (2008). *The use of standards for hot mixes. Technical Guide*.

Silva, H.; Pais, J.; Pereira, P. (2005). *Influence of the mastic binder in the bituminous mixtures behavior*. The 4th international conference on maintenance and rehabilitation of pavement and technological control.

Silva, H. M. R. D. (2005). *Caracterização do Mástique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mástique, Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Universidade do Minho, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Vias de Comunicação.

Silva, L. F. M; Ochsner, A.; Adams, R. D. (2011). *Handbook of adhesion technology*. Springer ISBN 978-3-642-01170-2.

Smit, A. F. (2011). *CAM mix design with Local aggregates*. CTR Technical Report.

Solaimanian, M.; Harvey, J.; Tahmoressi, M.; Tandon, V. (2003). *Test methods to predict moisture sensivity of hot mix asphalt pavements*. Moisture sensivity of asphalt pavements, topic 3. TRB seminar paper, 77-110.

Srivastara, A.; Rooijen, R. (2000). *Bitumen performance in hot and arid climates*. Innovative road rehabilitation recycling technologies.

Tanner, R. I.; Walters, K. (1998). *Rheology: An Historical Perspective*. Elsevier Science. ISBN: 0 444 82946 6.

Tarrer, A. R.; Wagh, V. (1991). *The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding*. Strategic Highway Research Program. Auburn University, Alabama.

Teixeira, A. (2000). *Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servo-pneumático*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, FEUP.

Teixeira, A.; Azevedo, M. C., (2007). *Adesividade agregado betume. Nova normalização*.

Teixeira, M. (2012). *Estudo coesão e adesividade de misturas betuminosas*. Tese mestrado em Engenharia Civil, FEUP.

Traxler, R. N. (1937). *The evaluation of mineral powders as fillers for asphalt*. Asphalt Paving Technologists. Proc. Assoc. 8, 60-67.

Tunnickliff, D. G. (1962). *A review of mineral filler*. Journal of the association of asphalt paving technologists Vol 31 pp 118-150.

Van Der Poel, C. (1954). *A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data*. Journal of Applied Chemistry.

Ven, M.; Jenkins, K. (2003). Rheological Characterisation of some (Polymer Modified) bitumen and bitumen-filler system at compaction and in-service temperatures. The 6th RILEM Symposium, Zurique.

Verhasselt, A. (2003). *Short-and long-term ageing of bituminous binders- Simulation with the RCAT method*. Proceeding PRO 28 Performance testing and evaluation of bituminous materials PTEBM'03.

Verhasselt, A. (2005). *Report of the limited round robin trial with RCAT*. Belgian Road Research Center.

Victoria, M. M. C.; Estébanez, P. C. (2009). *Reologia de los betumes com caucho*. IV Jornada Nacional, ASEFMA.

Virden, A. (2015). *Particle sizing masterclass 2*. Malvern.

Wang, H.; Al-Qadi, I.; Faheem, A. F.; Bahia, H.U.; Yang, S. H.; Reinke, G. H. (2011). *Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potencial*. Journal of the transportation Research board nº 2208.

Warden, W. B.; Hudson, S. B.; Howell, H. C. (1959). *Evaluation of mineral fillers in terms of practical pavement performance*. Asphalt Paving Technologists. Proc. Assoc. 28, 316–352.

West, R. C.; James, R. C. (2006). *Evaluation of a lime kiln dust as a mineral filler for stone matrix asphalt*. The 85 th annual meeting of the Transportation Research Board Washington.

Western Research Institute (2013). *Asphalt Research Consortium. Quarterly Technical Progress Report*.

Winniford, R. S. (1961). *The rheology of asphalt-filler systems as shown by the microviscometer*. ASTM, STP Nº 309, American Society for testing and materials. PP 109-120.

Yilmaz, A.; Sargin, S. (2012). *Water effect on deteriorations of asphalt pavements*. The Online Journal of Science and Technology.

Documentos normativos

AASHTO M17-11 (2011). *Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures.*

AASHTO M303-06 (2006). *Standard Specification for Lime for Asphalt Mixtures.*

AASHTO T37-07 (2007). *Standard Method of Test for Sieve Analysis of Mineral Filler for Hot-Mix Asphalt.*

AASHTO T133-11 (2011). *Standard Method of Test for Density of Hydraulic Cement.*

AASHTO T165-06 (2006). *Standard Specification for Effect of Water on Cohesion of Compacted Bituminous Mixtures.*

AASHTO T182-84 (1984). *Standard Specification for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures.*(Anulada)

AASHTO T283-03 (2003). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damages.*

AASHTO T330-07 (2007). *Standard Method of Test for the Qualitative Detection of Harmful Clays of the Smectite Group in Aggregates Using Methylene Blue.*

AASHTO TP – BBS (AASHTO, 2011). *Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Bitumen Bond Strength (BBS) Test.*

AASHTO TP5-98 (1998). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).*

AASHTO TP8-94 (1994). *Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).*

AASHTO TP31-96 (1996). *Method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension.*

AFNOR XP T66-043 (2006). *Liants Hydrocarbons. Essais d'Adhésivité Passive des Liants Anhydres en Presence d'Eau.*

ASTM C204-11 (2011). *Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus.*

ASTM C1097-13 (2013). *Standard Specification for Hydrated Lime for Use in Asphalt Cement or Bituminous Paving Mixtures*.

ASTM D907-12 (2012). *Standard Terminology of Adhesives*.

ASTM D242-09 (2009). *Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures*.

ASTM D546-10 (2010). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures*.

ASTM D1075-11 (2011). *Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures*.

ASTM D1664-85 (1985). *Standard Test Method for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures*.

ASTM D1754-14 (2014). *Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)*. Book of Standards Volume: 04.03.

ASTM D2872-12 (2012). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*.

ASTM D3625-01 (2001). *Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water*.

ASTM D4464-15 (2015). *Standard Test Method for Particle Size Distribution of Catalytic Material by Laser Light Scattering*.

ASTM D4541-02 (2002). *Standard Test Method for Pull-off strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*.

ASTM D4867-14 (2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*.

ASTM D 5381-14 (2014). *Standard Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders*.

ASTM D5550 (ASTM, 2014). *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer*.

ASTM D6521-13 (2013). *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*.

ASTM D7175-15 (2015). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.*

ASTM D7369-11 (2011). *Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test.*

ASTM D 7460-10 (2010). *Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending.*

EN 196-6 (CEN, 2010). *Methods of testing cement. Determination of fineness.*

EN 197-1 (CEN, 2011). *Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements.*

EN 459-1 (CEN, 2015). *Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria.*

EN 933-1 (CEN, 2012). *Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution - Sieving method.*

EN 933-9 (CEN, 2009). *Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines — Methylene blue test.*

EN 933-10 (CEN, 2009). *Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines. Grading of fillers (air-jet sieving).*

EN 1097-3 (CEN, 1998) - *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of loose bulk density and voids.*

EN 1097-4 (CEN, 2008). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the voids of dry compacted filler.*

EN 1097-7 (CEN, 2008). *Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the particle density of filler. Pyknometer method.*

EN 1426 (CEN, 2015). *Bitumen and Bituminous Binders-Determination of needle penetration.*

EN 1427 (CEN, 2015). *Bitumen and Bituminous Binders-Determination of the softening point-Ring and ball method.*

EN 1744-1 (CEN, 2009). *Tests for chemical properties of aggregates. Chemical analysis.*

EN 1744-4 (CEN, 2005). *Tests for chemical properties of aggregates. Determination of water susceptibility of fillers for bituminous mixtures.*

EN 12591 (1999). *Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens. (Anulada)*

EN 12591 (2009). *Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.*

EN 12592 (CEN, 2014) - *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of solubility*

EN 12593 (CEN, 2015) - *Bitumen and Bituminous Binders-Determination of the Fraass breaking point.*

EN 12595 (CEN, 2014). *Bitumen and bituminous binders. Determination of kinematic viscosity.*

EN 12596 (CEN, 2014). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary.*

EN 12597 (CEN, 2014). *Bitumen and bituminous binders. Terminology.*

EN 12606-1 (CEN, 2015). *Bitumen and bituminous binders - Determination of the paraffin wax content. Method by distillation.*

EN 12606-2 (1999). *Bitumen and bituminous binders - Determination of the paraffin wax content. Method of extraction.*

EN 12607-1 (CEN, 2014). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. RTFOT method.*

EN 12607-2 (CEN, 2014). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. TFOT method.*

EN 12607-3 (CEN, 2014). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. RFT Method.*

EN 12697-11 (CEN, 2012). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Determination of the affinity between aggregate and bitumen.*

EN 12697-12 (CEN, 2008). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.*

EN 12697-17 (CEN, 2004). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix Asphalt. Particle loss of porous asphalt specimen.*

EN 12697-22 (CEN, 2003). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking.*

EN 12697-24 (CEN, 2012). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Resistance to fatigue.*

EN 12697-25 (CEN, 2005). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Cyclic compression test.*

EN 12697-26 (CEN, 2012). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness.*

EN 12697-30 (CEN, 2012). *Bituminous mixtures. Test method for hot mix asphalt. Specimen preparation by impact compactor.*

EN 12697-40 (CEN, 2012). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. In situ drainability.*

EN 13043 (CEN, 2002). *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatment for roads, airfields and other trafficked areas.*

EN 13108-1 (CEN, 2006). *Bituminous mixtures. Material specifications. Asphalt Concrete.*

EN 13108-6 (CEN, 2006). *Bituminous mixtures. Material specifications. Mastic Asphalt.*

EN 13179-1 (CEN, 2013). *Tests for filler aggregate used in bituminous mixtures. Delta ring and ball test.*

EN 13179-2 (CEN, 2000). *Tests for filler aggregate used in bituminous mixtures. Bitumen number.*

EN 13302 (CEN, 2010). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus.*

EN 13398 (CEN, 2010). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the elastic recovery of modified bitumen.*

EN 13399 (CEN, 2010). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of storage stability of modified bitumen.*

EN 13589 (CEN, 2008). *Bitumen and Bituminous Binders. Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method.*

EN 13924 (CEN, 2006). *Bitumen and Bituminous Binders. Specification for hard paving grade bitumen.*

EN 14023 (CEN, 2010). *Bitumen and Bituminous Binders. Specification Framework for Polymer Modified Bitumens.*

EN 14769 (CEN, 2012). *Bitumen and Bituminous Binders. Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV).*

EN 14770 (CEN, 2012). *Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle. Dynamic Shear Rheometer (DSR).*

EN 15323 (CEN, 2007). *Bitumen and Bituminous Binders. Accelerated long-term ageing conditioning by the rotating cylinder method (RCAT).*

EN ISO 2592 (CEN, 2001). *Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method (ISO 2592:2000).*

ISO 787-9 (1981). *General methods of test for pigments and extenders. Determination of pH value of an aqueous suspension.*

ISO 3310-1 (2000). *Test sieves. Technical requirements and testing. Test sieves of metal wire cloth.*

ISO 13317-1 (2001). *Determination of particle size distribution by gravitational liquid sedimentation methods. General principles and guidelines.*

ISO 13317-2 (2001). *Determination of particle size distribution by gravitational liquid sedimentation methods. Fixed pipette method.*

ISO 13317-3 (2001). *Determination of particle size distribution by gravitational liquid sedimentation methods. X-Ray gravitational technique.*

ISO 13317-4 (2014). *Determination of particle size distribution by gravitational liquid sedimentation methods. Balance method.*

ISO 13320 (2009). *Particle size analysis. Laser diffraction methods.*

ISO 13322-1 (2014). *Particle size analysis. Image analysis methods. Static image analysis methods.*

ISO 13322-2 (2006). *Image analysis methods. Dynamic image analysis methods.*

ISO 15901-2 (2006). *Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption. Part 2: Analysis of mesopores and macropores by gas adsorption.*

ISO 22412 (2008). *Particle Size Analysis. Dynamic Light Scattering (DLS).*

NLT 327 (2000). Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes com el permeâmetro LCS. CEDEX.

NLT 362 (1992). *Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas betuminosas de granulometria abierta, mediante el ensayo cántabro de perdía por desgaste*. CEDEX.

NP EN 13043 (IPQ, 2004). *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*.

NP EN 14023 (IPQ, 2013). *Betume modificado- Anexo Nacional*.